

**EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE SECADO EN PEREIRA Y DOSQUEBRADAS
DE SECADORES SOLARES DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS**

ADIELA PATRICIA MORALES LEDESMA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRIA EN ECOTECNOLOGIA
PEREIRA, RISARALDA**

2020

**EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE SECADO EN PEREIRA Y DOSQUEBRADAS
DE SECADORES SOLARES DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS**

ADIELA PATRICIA MORALES LEDESMA

**Tesis de grado presentada como requisito para optar al título de
Magister en Ecotecnología**

Director

Dr. Juan Mauricio Castaño

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA

PEREIRA, RISARALDA

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Firma Director

Pereira, junio de 2020

Agradecimientos

A mi familia, que siempre ha apoyado mis decisiones, a la Tita mi fiel amiga que con su silenciosa presencia será por siempre mi gran animadora y compañera.

Al director Juan Mauricio, quien me alentó a cerrar éste ciclo y culminar éste proyecto con el ánimo de continuar con otros.

Al Dr Carlos Eugenio Oliveros, de CENICAFE, de quien aprendí mucho sobre secado de productos agrícolas y sobre todo me enseñó a ponerle ganas a todo cuanto uno emprende.

Y ante todo a la Red Hidroclimatológica REDH, sin la colaboración de ellos para poder acceder a la información no habría sido posible realizar éste proyecto, especialmente de Norma Castro, agradezco también el decisivo apoyo de Norma Duran

Resumen

Risaralda es un departamento con una alta vocación agrícola y los campesinos deben llevar sus productos a las cabeceras municipales, con la dificultad de no ser procesados y por ende altamente perecederos. La tecnología de deshidratación solar de los productos agrícolas es una buena alternativa para que no pierdan sus cosechas, alarguen la vida útil de los productos y les agreguen valor, sin embargo esta tecnología no funciona de la misma manera en todos los lugares, para sacar el mayor provecho posible y maximizar la ventaja que ofrece el hecho de estar ubicados en el trópico y así darle un uso eficiente a la energía solar térmica, se abordan en éste trabajo por un lado los temas concernientes a la energía solar y particularmente las aplicaciones para el procesamiento de productos agrícolas de corta duración, considerando las variables ambientales de los municipios de Pereira y Dosquebradas que pueden beneficiar el proceso de secado con deshidratadores solares, análisis que puede ser muy valioso para tomar decisiones sobre el diseño, la ubicación y la orientación de los deshidratadores, sin que se tenga que recurrir al uso de extractores de aire o ventiladores, es decir, empleando convección natural, con lo que no se incurre en costos extras y lo hace independiente de la energía eléctrica.

A manera de proyecto piloto y con el propósito de mostrar que fuera de la radiación solar, las condiciones climáticas como temperatura y humedad relativa de un lugar determinado, inciden en la eficiencia de los deshidratadores solares, se abordó el estudio en los municipios de Pereira y Dosquebradas, donde la Red Hidroclimatológica de Risaralda REDH tiene varios puntos de toma de datos y se contrastan con un punto en el municipio de Santa Rosa de Cabal ubicado en zona de paramo, para con el análisis de ésta información calcular el potencial total de secado en los dos municipios., con secadores solares tipo túnel y planos que trabajan por convección natural.

Palabras Clave: Energía solar, Secado solar, Potencial de secado.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	5
Lista de Tablas.....	7
Lista de Figuras	8
Lista de Anexos	10
1 Capítulo I Secado solar.....	11
1.1 Introducción	11
1.2 Secado Solar	12
2 Capítulo II Artículo	16
2.1 Resumen.....	16
2.2 Introducción	17
2.3 Estimación del potencial de secado	18
2.4 Métodos y Resultados	19
2.4.1 Resultados Estaciones Meteorológicas.....	23
2.4.2 Resultados de Potencial de secado	43
2.4.3 Potencial de secado y Velocidad de secado	51
2.5 Discusión de Resultados	54
3. CAPITULO III Conclusiones y Recomendaciones.....	55
3.1 Conclusiones	55
3.2 Recomendaciones	56
4. BIBLIOGRAFÍA	58
. ANEXOS	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Prueba de Kruskal –Wallis para CAM y Alto del Nudo de Temp, Hum y Rad	29
Tabla 2 Resultados Kruskal–Wallis temperatura, humedad y radiación en febrero y mayo en Dosquebradas	30
Tabla 3 Resultados prueba de Kruskal –Wallis para Pereira de temperatura, humedad y Radiación	39
Tabla 4 Resultados Kruskal–Wallis para Temperatura, Humedad y Radiación en febrero y mayo en Pereira	40
Tabla 5 Resultados obtenidos estaciones y análisis psicométrico para Potencial total	45
Tabla 6 Potencial total de secado para los sitios de estudio	46
Tabla 7 Tiempo en días solares requeridos para secar Banano	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de proceso en cabina de secado	18
Figura 2 Mapa de sitios de toma de datos	20
Figura 3 Relación Temperatura- Humedad Relativa Febrero Dosquebradas	23
Figura 4 Relación Temperatura- Humedad Relativa Mayo Dosquebradas	24
Figura 5 Medias marginales temperatura y humedad Febrero Mayo Dosquebradas	24
Figura 6 Relación Humedad Relativa-Radiación Solar Febrero Dosquebradas.....	25
Figura 7 Relación Humedad Relativa-Radiación Solar Mayo Dosquebradas.....	26
Figura 8 Relación Temperatura-Radiación Solar Febrero Dosquebradas	27
Figura 9 Relación Temperatura-Radiación Solar Mayo Dosquebradas	27
Figura 10 Media marginal Radiación solar Febrero y Mayo Dosquebradas	28
Figura 11 Prueba Kruskal-Wallis Temperatura Dosquebradas febrero y mayo.....	31
Figura 12 Prueba Kruskal-Wallis Humedad Dosquebradas febrero y mayo	32
Figura 13 Prueba Kruskal-Wallis Radiación Dosquebradas febrero y mayo	33
Figura 14 Relación Temperatura –Humedad Relativa Febrero Pereira	33
Figura 15 Relación Temperatura –Humedad Relativa Mayo Pereira.....	34
Figura 16 Medias marginales Temperatura y Humedad- Febrero y Mayo Pereira	34
Figura 17 Relación Humedad Relativa-Radiación Solar Febrero Pereira.....	35
Figura 18 Relación Humedad Relativa- Radiación Solar Mayo Pereira	36
Figura 19 Relación Temperatura- Radiación Solar Febrero Pereira	37
Figura 20 Relación Temperatura- Radiación Solar Mayo Pereira	37
Figura 21 Medias marginales Radiación Solar –Febrero y Mayo Pereira.....	38
Figura 22 Prueba Kruskal-Wallis Temperatura Pereira febrero y mayo	41
Figura 23 Prueba Kruskal-Wallis Humedad Pereira febrero y mayo	42

Figura 24 Prueba Kruskal-Wallis Radiación Pereira febrero y mayo	43
Figura 25 Potencial de secado Pereira y Dosquebradas meses de Feb y Mayo en Watts .	46
Figura 26 Mapa de temperatura para el mes de febrero en el oriente de Risaralda.....	48
Figura 27 Mapa de temperatura para el mes de mayo en el oriente de Risaralda	48
Figura 28 Mapa de comportamiento de humedad en Risaralda en el mes de febrero.....	49
Figura 29 Mapa de comportamiento de humedad en Risaralda en el mes de mayo.....	49
Figura 30 Mapa de radiación solar para el mes de febrero en Risaralda	50
Figura 31 Mapa de radiación solar para Risaralda mes de mayo	50
Figura 32 Deshidratador solar tipo túnel PML01	52
Figura 33 Potencial de secado mapeado según emplazamiento febrero.....	53
Figura 34 Mapa de radiación solar para el mes de febrero en Risaralda	53

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1	61
---------------	----

1. CAPITULO I

Secado solar

1.1 Introducción

Un modelo de desarrollo que permita combinar el crecimiento de la riqueza y del bienestar social con la preservación del medio natural y la asunción de unos niveles suficientes de seguridad ecológica, sanitaria y social es lo que significa el desarrollo sostenible (Almeida et al, 2015). Alcanzarlo consiste en asumir la competitividad como derivada de la implementación de tecnologías limpias y las nuevas oportunidades de negocio que brinda la economía verde, factores estos que tienen una importancia creciente en las estrategias de desarrollo, es decir, implementar un modelo apoyado en la producción más limpia como una estrategia para disminuir el impacto de las actividades productivas sobre el medio natural unido a una racionalización del uso de recursos primarios y energéticos y un mejor aprovechamiento de éstos.

La energía solar como una fuente energética limpia aplicada a procesos agroindustriales contribuye al cumplimiento de lo planteado y es por esto que se desarrollaran con amplitud tanto los conceptos de energía solar como la aplicación de secadores solares a productos del campo y la manera como estos pueden emplearse con máxima eficiencia y por convección natural, para no incurrir en costos extras por la energía que demandan los ventiladores y aprovechar las condiciones climáticas.

Si bien es cierto que la energía solar ha sido usada desde tiempos inmemoriales para conservar productos como frutas y vegetales, su implementación no ha derivado en ajustar los diseños o dimensionamientos a las condiciones propias de cada lugar, los desarrollos de los secadores parten de comportamientos ideales y no de particularidades geográficas, lo que hace que no trabajen de manera eficiente, particularmente en países como Colombia donde encontramos valles y laderas no podemos pretender que los equipos diseñados para secar productos agrícolas funcionen igual a 1100 msnm que ha 1600 msnm, por tal motivo es importante que conociendo las condiciones climáticas y la radiación solar, se pueda abordar el diseño o al menos el dimensionamiento de los secadores solares, conociendo para cada lugar de instalación, las condiciones que la hacen propicia para su buen funcionamiento, aún más si se considera que es una información que existe, está disponible por tanto se puede recolectar y sistematizar con la intención de conocer el potencial de secado de un lugar determinado.

Es así como el objetivo de éste proyecto fue determinar las zonas con alto potencial de aplicación de secadores solares tipo túnel basado en las condiciones climáticas en los municipios Pereira y Dosquebradas, calculando el potencial de secado. Para lograr lo propuesto se realizó un análisis de las variables climáticas temperatura, humedad y radiación solar empleando los datos disponibles de la red Hidroclimatológica de Risaralda en los municipios de Pereira y Dosquebradas.

A partir de un estudio de las condiciones climáticas durante los meses que se presentan según el IDEAM, la radiación solar máxima y mínima en los municipios de Pereira y Dosquebradas, análisis que se centró en variables como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar para los municipios mencionados y posteriormente con esta información se hizo el cálculo del potencial total de secado.

1.2. SECADO SOLAR

El secado o deshidratación es un proceso al cual se apela para conservar alimentos altamente perecederos que consiste en la aplicación de calor por medio de aire caliente, en él ocurren simultáneamente transferencia de energía y calor y transferencia de humedad interna a la superficie del sólido y su evaporación (Tiwari, 2016). En procesos que se conocen respectivamente como transferencia de energía y de masa, ambos necesarios para que se genere un cambio de fase del agua.

El propósito fundamental del secado es alargar la vida útil de los productos al reducir el contenido de agua de frutas y hortalizas para disminuir por esta vía la actividad microbiana que puede producir su descomposición; sin embargo, solo con el aumento de la temperatura no se dan condiciones para causar la inactivación de la actividad microbiana, lo que hace que cualquier aumento de la humedad durante el proceso o el almacenamiento puede resultar en un agente de deterioro de los productos. De otro lado, en el proceso de secado por la evaporación del agua contenida se da una reducción de peso y volumen que resultan ser una ventaja para transportar los productos, lo cual se traduce en reducción de costos y espacio de almacenamiento (Espinoza, 2016).

El secado solar se puede aplicar por exposición directa al sol o por medio de secadores solares. En el primer caso, el secado solar se ha usado comúnmente en el campo, esta se hace al poner los productos al sol sin ninguna protección, quedando

expuestos a agentes externos como insectos, polvo o residuos orgánicos, que pueden generar problemas de salud a quienes los consumen, además de producir sobre exposición y la consecuente quema del producto, por efecto de los rayos solares actuando directamente sobre él (Norton, 2017).

La segunda forma de secado solar es empleando secadores solares, los cuales resultan ser una alternativa para los pequeños productores o campesinos que no pueden acceder a una planta deshidratadora por los altos costos que conlleva no solamente el horno de secado convencional, sino el costo asociado a los combustibles o la fuente de energía que demanda para generar calor, estos son usualmente combustibles como el diésel, el gas o la energía eléctrica, esta última en caso de estar ubicados en un área que pertenezca al sistema interconectado de energía. Los secadores solares requieren algunas condiciones para el emplazamiento y el diseño como, la humedad relativa, altas temperaturas y alta radiación solar, para que trabajen eficientemente (Phonetip et al., 2018).

Entre los diferentes tipos de secadores solares se encuentran los deshidratadores solares tipo túnel, que permiten con el dimensionamiento adecuado tener control sobre las variables como temperatura y humedad al interior de ellos. Con su implementación se obtienen temperaturas que oscilan entre los 40 °C y los 60 °C ideales para extraer lentamente la humedad de frutas y vegetales que impiden que se generen capas duras en la superficie de los productos y por consiguiente que retenga el agua al interior, que puede ocasionar deterioro de los productos, una de sus ventajas es que mantienen propiedades nutricionales de los productos.

Los secadores o deshidratadores solares tipo túnel se usan principalmente para deshidratar frutas, vegetales y hierbas aromáticas, mantiene aislado el producto del exterior, por lo que la calidad del producto deshidratado es mejor y es más eficiente que el secado solar a cielo abierto (Verma P and Nidhi, 2017).

El proceso para remover la humedad de la superficie del producto que se va a deshidratar depende también de condiciones externas al deshidratador como la temperatura, la humedad relativa, el flujo de aire y principalmente de la radiación solar (Idowu *et al*, 2013). Con respecto a esta última variable, la magnitud de la radiación solar captada por un colector solar está asociada a factores de localización como la latitud, el ángulo de inclinación, la posición angular del sol al medio día con respecto al plano del

ecuador, con lo que Colombia por su ubicación en el trópico tiene condiciones favorables para usar la energía solar térmica.

Por lo tanto se plantea la deshidratación solar como una alternativa que puede servir para que las pérdidas de los productos del campo por descomposición antes de llegar al mercado sean mucho menores y sean económicamente viables (FAO, 2016).

El secado es el proceso de reducción de la humedad hasta un límite seguro de contenido de humedad o cantidad de agua en un producto, punto en el cual por experimentación se ha considerado que se inhibe la actividad microbiana. El porcentaje de sequedad depende del contenido de humedad en los productos agrícolas, ya sea sobre una base húmeda o seca denominada como, actividad de agua o el límite seguro de agua denotado como A_w (Prakash, 2014).

El sistema de secado convencional para conservar frutas, verduras, granos, pescado, carne, madera y otros productos agrícolas es el secado al sol, que es una fuente de energía gratuita y renovable (Islam and Doncer, 2017). El secado de frutas y verduras por exposición directa al sol sin ningún elemento que lo proteja, es decir, al aire libre bajo la luz solar directa no demanda ningún conocimiento previo y no tiene costos, sin embargo, los productos secos obtenidos por éste medio pueden llegar a presentar moho por no tener protección contra la lluvia así como velocidades de secado incontroladas, que generan secados diferentes en los productos, que se traduce en que algunos productos queden muy secos y otros aún húmedos (Fudholi et al., 2014).

El secado directo al sol al aire libre, afecta negativamente la calidad (color y contenido de vitamina) de ciertas frutas y verduras como lo describen (Satwase et al., 2013). Quienes compararon el secado al sol al aire libre con el secado a través de secadores solares, concluyeron, que no solamente es mucho más limpio sino que mejora la calidad de los productos.

Algunos otros estudios comparando el secado natural y el secado a través de secadores solares, concluyen que los secadores solares son más efectivos, ya que generan temperaturas más altas, más baja humedad y menor contenido de humedad del producto final, estos factores producen un deterioro reducido comparado con lo que sucede durante el proceso de secado directo al sol (Umogbai and Iorter, 2013) (Banout, 2016).

La exposición directa al sol sin ningún elemento que cubra el producto presenta inconvenientes que van desde la contaminación, el daño por los animales, a la lentitud o tasas de secado incontroladas y falta de protección contra la lluvia o el rocío. Otra razón importante es que tiende a fomentar el crecimiento de moho que puede resultar en calidad variable de los productos finales debido a un secado excesivo o insuficiente. Por otro lado se requiere gran extensión de tierra para esparcir las capas muy delgadas de alimentos, el secado es laborioso debido a que los productos expuestos al sol deben ser retirados o movidos en caso de lluvia u otra condición climática adversa (Kumar, 2014).

El secado al sol abierto todavía se practica ampliamente en la mayoría de los países en desarrollo, los productos son secados sobre el suelo aunque puede ser en concreto, el producto se contamina por polvo e insectos (Rolle et al., 2013).

Los productos secados con secadores solares, no solo alargan la vida de los productos sino que además dan como resultado productos de mejor calidad, tienen un secado uniforme por tanto también se ven homogéneos. Hay varios tipos de secadores solares los cuales se clasifican según la forma de circulación de aire en, de circulación natural y circulación forzada o mejor denominados por convección natural y por convección forzada. Secadores; basado en el tipo de secado, como el secado solar directo, el secado solar indirecto y el secado solar en modo mixto (Phadke et al., 2015). Siendo los primeros los secadores solares por convección natural, los de mejor resultado, porque no requieren ventiladores que demandan para su uso energía eléctrica y alcanzan temperaturas entre 55 °C y 85 °C máximo, mientras los de convección forzada alcanzan temperaturas entre 80 °C y 95 °C (Jambhulkar et al., 2017). Las temperaturas recomendadas para el secado de productos agrícolas oscilan entre los 50 y los 75 °C (Aravindh et al., 2015). Lo cual muestra que los secadores solares tipo túnel que trabajan con convección natural son recomendados para productos agrícolas, por su fácil construcción y la calidad de los productos deshidratados con estos (Rajarajeswari et al., 2016).

El empleo de secadores solares tiene muchas ventajas comparado con el secado por exposición directa al sol: se obtiene una calidad superior, conserva nutrientes y la apariencia de los productos es más uniforme aunque para lograr mayor rendimiento de los secadores solares se han de conocer muy bien los datos de la zona de emplazamiento, además de recurrir al uso de tablas psicométricas para el cálculo del área

y si se considera necesario también tiempos aproximados de secado (Sharma VK and Anyanwu CN, 2017).

Para evaluar el potencial de secado y lograr una mayor eficiencia en el empleo de los secadores solares se debe tener el control de la incidencia de la radiación solar, la latitud, la longitud, la temperatura y la humedad relativa como lo han demostrado (Simate and Cherotich, 2017)(Hegde et al., 2015)(Condori *et al.*, 2014).

2. CAPÍTULO II

Evaluación de potencial de secado en Pereira y Dosquebradas de secadores solares de productos agrícolas

2.1 Resumen

Con el fin de apoyar a investigadores y emprendedores en agroindustria que requieran el uso de energía solar térmica en el proceso de deshidratar y alargar la vida útil de productos del campo y así mejorar las condiciones económicas de los campesinos del departamento de Risaralda. Se hace un análisis de las condiciones climáticas que más influyen en el diseño, montaje y eficiencia de secadores solares tipo túnel y planos, para que al momento de realizar el dimensionamiento, se logre el mayor rendimiento del equipo de secado acorde al entorno del lugar de emplazamiento. Para ello, se analizan el comportamiento de los meses de febrero y mayo de variables como: Radiación Solar, Temperatura y Humedad Relativa, empleando la serie de datos de la Red Hidroclimatológica de Risaralda REDH en los municipios de Pereira y Dosquebradas, con los que se obtienen graficas de una serie de Tiempo vs Temperatura y Humedad, Temperatura y Radiación solar, Radiación Solar y Humedad, Humedad y Temperatura de cada uno de los sitios de toma de datos, para con esta información calcular el potencial total de secado que depende tanto de la Temperatura T del lugar, como de la humedad relativa HR del mismo, sumado al potencial de secado correspondiente a la energía solar, es decir, de la radiación solar y el área de exposición de secado.

Con lo anterior a manera de ejemplo, se evalúa la incidencia de estas variables en el potencial total de secado, con un producto común como el banano, en los meses mencionados, que se consideran los de mayor y menor radiación solar para el departamento de Risaralda.

Palabras Clave: *Energía solar, Secado solar, Potencial de secado*

Abstract

In order to support researchers and entrepreneurs in agribusiness that require the use of thermal solar energy in the process of dehydrating and lengthening the useful life of products from the field and thus improve the economic conditions of the farmers of the department of Risaralda. An analysis is made of the climatic conditions that most influence the design, assembly and efficiency of solar tunnel and plane dryers, so that when sizing is carried out, the highest

performance of the drying equipment is achieved according to the environment of the place of site. For this, the behavior of the months of February and May of variables such as: Solar Radiation, Temperature and Relative Humidity are analyzed, using the data series of the Hydroclimatological Network of Risaralda REDH in the municipalities of Pereira and Dosquebradas, with which Obtain graphs of a series of Time vs Temperature and Humidity, Temperature and Solar Radiation, Solar Radiation and Humidity, Humidity and Temperature of each of the data collection sites, with this information calculating the total drying potential that depends on both the temperature T of the place, as well as the relative humidity RH thereof, added to the drying potential corresponding to solar energy, that is, from solar radiation and the drying exposure área.

With the above as an example, these variables are evaluated with a common product such as bananas, in the months mentioned, which are considered the ones with the highest and lowest solar radiation for the department of Risaralda.

Keywords: *Solar energy, Solar drying, Drying potential*

2.2 Introducción

El departamento de Risaralda se considera una región con vocación agrícola, pese a esto los campesinos son en su gran mayoría poseedores de extensiones de tierra que no supera las 1,5 Ha como se señala en el atlas de la distribución de la propiedad rural en Colombia (IGAC, 2012). Por esto la preocupación que demuestra el gobierno departamental al priorizar las acciones que mejoren la productividad del sector agrícola y que se refleja en el plan de inversiones PPI 2015-2018 Departamento de Risaralda (DNP, 2014).

Es así, como el procesamiento de productos agrícolas de corta duración pueden ser una muy buena alternativa para los agricultores que buscan aumentar la vida útil de los producto del campo y hacer más productiva su tierra agregando valor a los productos, sobre todo si se considera que la mayor parte de los productos que obtienen de sus parcelas son altamente perecederos, en ese caso la deshidratación solar, que se ha practicado tradicionalmente para algunas variedades de productos agrícolas como lo es el caso del café, se convierte en una alternativa viable para productos como plantas aromáticas, frutas, hortalizas y vegetales.

Adicionalmente Colombia, goza de una posición privilegiada para la implementación de soluciones con energía solar, debido a su ubicación en el trópico, lo que garantiza que la oferta solar es mayor y se corrobora con unos datos de radiación solar de entre 4,5 y 5,5 kWh/m² particularmente para el departamento de Risaralda (IDEAM, 2017).

El uso eficiente de concentradores solares y hornos para deshidratar productos del campo, abre muchas vías para el procesamiento de alimentos especialmente para pequeños agricultores, que manejan bajos volúmenes. Su empleo contribuiría a mejorar sustancialmente las condiciones del campo como una alternativa de emprendimiento para pequeños tenedores de tierra, si se considera que los productos al perder el agua en el proceso de deshidratación, también pierden peso y volumen, razón que los hace más fácil para su transporte.

De ahí la importancia y necesidad de evaluar el potencial de secado para el uso de energía solar térmica, específicamente para el secado de productos agrícolas, de una región, que no es otra cosa que identificar y analizar las condiciones determinadas por variables asociadas a su ubicación como son, la latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, que a su vez se asocian a las condiciones climáticas como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad de viento.

2.3 Estimación del potencial de secado

La capacidad que tenga un dispositivo de secado para extraer el agua del producto a secar depende del sitio de emplazamiento, por lo que se debe evaluar el potencial de una región para implementar secadores o deshidratadores solares y se han de considerar no solamente las condiciones ambientales como temperatura media, humedad relativa y radiación solar, sino que también se debe conocer la manera como estas intervienen en el proceso de secado o evaporación de la humedad contenida en los productos que se quieran deshidratar y el modo como todas estas variables interactúan. Para el caso de un secador solar tipo túnel, lo anterior se da como el esquema de la Fig 1, donde se ilustra como lo que entra o incide en el sistema son la radiación solar I y la masa de aire que entra al sistema se encuentra a una temperatura T_a y a una humedad relativa HR , la que al pasar sobre el producto modifica condiciones al interior del sistema con una temperatura T_s aire que al salir nos dará una masa de aire a una temperatura T_w

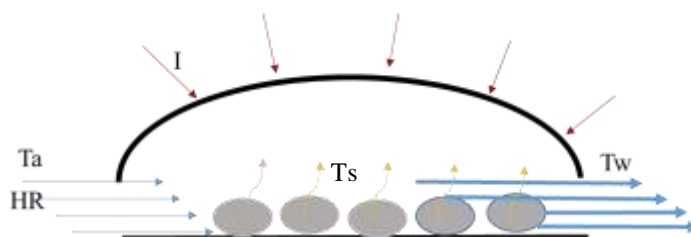


Fig 1 Esquema de proceso en cabina de secado

Lo anterior tiene explicación por los dos procesos que interactúan en el secado o que se dan simultáneamente en el proceso de secado, como son el intercambio de masa y de energía en el que ocurre además un cambio de estado. Por tanto la transferencia de energía y masa inicia cuando el medio de secado o masa de aire caliente entra en contacto con el producto a secar, en ese momento el calor se transfiere a la superficie del producto por convección y a través del material a secar por conducción. Para el caso de secadores solares en los que el medio de secado es el aire, se ha de identificar en primera instancia la velocidad de evaporación del agua, para lo cual se usa la ley de difusión de masa de Fick

$$\dot{m}_e = A h_d (W_s(T_w) - W) \quad (4)$$

\dot{m}_e expresado en (kg/s) la velocidad de evaporación o de transmisión de calor

A (m^2) Área expuesta para la evaporación del agua.

W_s Humedad específica de saturación

W Humedad específica del aire.

h_d (kg/m^2s) Coeficiente de difusión de masa, que depende del diseño, de la forma como entra el aire y de la temperatura.

2.4 Métodos y Resultados

El análisis se hizo de los meses de febrero y mayo del año 2018. El criterio para esta decisión es la intensidad de la radiación solar media anual según datos del IDEAM para el departamento de Risaralda, asociado a regímenes de lluvia (mayo) y época seca (febrero). Que muestran que en estos dos meses se presentan la radiación solar máxima y mínima, las horas a analizar son las de máxima radiación solar día, es decir entre las 10:00 y las 17:00 horas.

Los sitios en los cuales se realizó el análisis de la información están ubicados en el sur oriente del departamento de Risaralda (Fig 2) en los municipios de Pereira, en las estaciones meteorológicas de La UTP y el Lago, Dosquebradas, en las estaciones del CAM y el Alto del Nudo y Santa Rosa de Cabal, estación Cortaderal



Fig 2 Mapa de sitios de toma de datos

La estación de Cortaderal corresponde a la zona de páramo, con lo que se muestra el contraste, debido a que presenta condiciones climatológicas extremas durante todo el año.

Las variables analizadas fueron Radiación solar RS, Temperatura T, Humedad Relativa HR, Latitud y Altitud de los puntos de toma de datos en los municipios de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal (Fuente de series de datos REDH), de estas se hizo la estimación de variabilidad y promedios de los meses de febrero y mayo con datos cada cinco minutos de las horas ya señaladas en los lugares indicados.

Los datos arrojados se graficaron empleando Tableau que permite visualizar la información y hacer las comparaciones tanto por municipios como por meses. Con SPSS, se realizó un análisis de correlaciones entre puntos de toma de datos y análisis de varianza para verificar si hay o no diferencias entre puntos de muestreo, la información de las variables fueron el insumo para abordar el análisis y cálculo del potencial total de secado, que corresponde a la sumatoria del potencial de evaporación que depende de la **temperatura y humedad de emplazamiento** más el potencial de secado que corresponde a la energía solar que obedece a la **radiación solar del lugar y el área de exposición de secado**. Para evaluar el Potencial total de secado se siguió la metodología de evaluación de potencial total de secado, que ha venido desarrollando

(Condorí, 2009). Probado para diferentes localidades de la provincia de Salta en Argentina, analizando las condiciones climáticas que afectan la eficiencia del proceso de secado (Condorí et al., 2014). Para los cuales plantea el uso de las ecuaciones que se describen.

Para el cálculo de la energía necesaria para evaporar la humedad contenida en el producto Q_o , se entiende que la humedad y la energía que gane el aire es la que ha perdido el producto, es decir, la energía requerida para convertir el agua en vapor, con la velocidad \dot{m}_e será:

$$Q_o = \dot{m}_e q_v \quad (5)$$

q_v Calor latente de evaporación evaluado a temperatura de saturación de la superficie

Considera Condori que simultáneamente se forma un gradiente de temperatura entre la temperatura de la superficie del producto T_w y la del aire húmedo T . La “ley de enfriamiento de Newton” que dice, cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido en la unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo por conducción, convección y radiación es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo, establece la siguiente relación entre este gradiente y la difusión de calor:

$$Q_c = h_c A_d (T_w - T) \quad (6)$$

Donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección expresado en $W/m^2°C$ que es función de la velocidad del aire sobre la superficie y T es la temperatura del aire húmedo.

Adicionalmente sobre la superficie incide la radiación solar y la potencia de esta se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{rs} = (\tau \alpha) A_d I \quad (7)$$

I es la radiación solar que incide sobre una superficie horizontal, τ es la transmisividad de la cubierta y α el coeficiente de absorción del agua para la radiación solar.

Si se asume $\tau\alpha$ como 1, el potencial correspondiente a la energía solar P_{rs} , es la radiación solar que incide sobre el secador, que tiene un área A_d .

$$P_{RS} = (\dot{m}_e q_v)_{\max} = A_d I \quad (8)$$

La energía utilizada en producir la evaporación se determina a partir del balance de energía sobre la superficie del producto.

$$\dot{m}_e q_v = A_d I + h_c A_d (T_w - T) \quad (9)$$

La cantidad de agua que se puede evaporar sin radiación solar se da por el aporte del cambio de calor sensible del aire.

$$P_a = \dot{m}_a C_p (T_a - T_w) \quad (10)$$

Con la ecuación de balance de masa se determina la velocidad de secado, sin radiación solar, cuando el aire está bajo esta condición de saturación. En un proceso de saturación adiabática.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_a [W_s(T_w) - W_a] \quad (11)$$

De donde el potencial de secado del aire P_a , sin radiación solar, expresado en unidades de potencia es:

$$P_a = (q_v \dot{m}_e)_{\max} = q_v \dot{m}_a [W_s(T_w) - W_a] \quad (12)$$

Con ésta expresión se calcula la cantidad de energía asociada al agua que podría ser incorporada al ambiente o evaporada, siendo $[W_s(T_w) - W_a]$ lo que aun falta de saturación.

Por tanto el potencial total de secado P_T continua Condori, está directamente relacionado con la radiación solar del lugar de emplazamiento y también con la potencia asociada a la cantidad de agua evaporada, que dependen de la temperatura ambiente y la humedad relativa, con estos datos y conociendo la presión atmosférica del lugar se obtendrán por cálculos psicrométricos todos los otros datos como la temperatura de bulbo húmedo, temperatura de saturación y la humedad específica.

$$P_T = P_{RS} + P_a = A_d I + q_v \dot{m}_a [W_s(T_w) - W_a] \quad (13)$$

2.4.1 Resultados de las estaciones meteorológicas

La información obtenida de la REDH de las series datos de las estaciones meteorológicas, de los meses de febrero y mayo de 2018, que reportan información cada 5 minutos de todos los días de los meses señalados, se analizaron y graficaron usando el software Tableau, con los promedios mes de las variables Temperatura, Humedad Relativa y Radiación solar, se hicieron los cálculos de promedios del día solar de las 10:00 a las 17:00 horas, dando como resultados análisis de variables como Temperatura – Humedad Relativa, Humedad Relativa-Radiación Solar y Radiación Solar –Temperatura, para febrero y mayo en las estaciones ya identificadas. Luego se realizaron los cálculos psicrométricos y la evaluación del potencial total de secado.

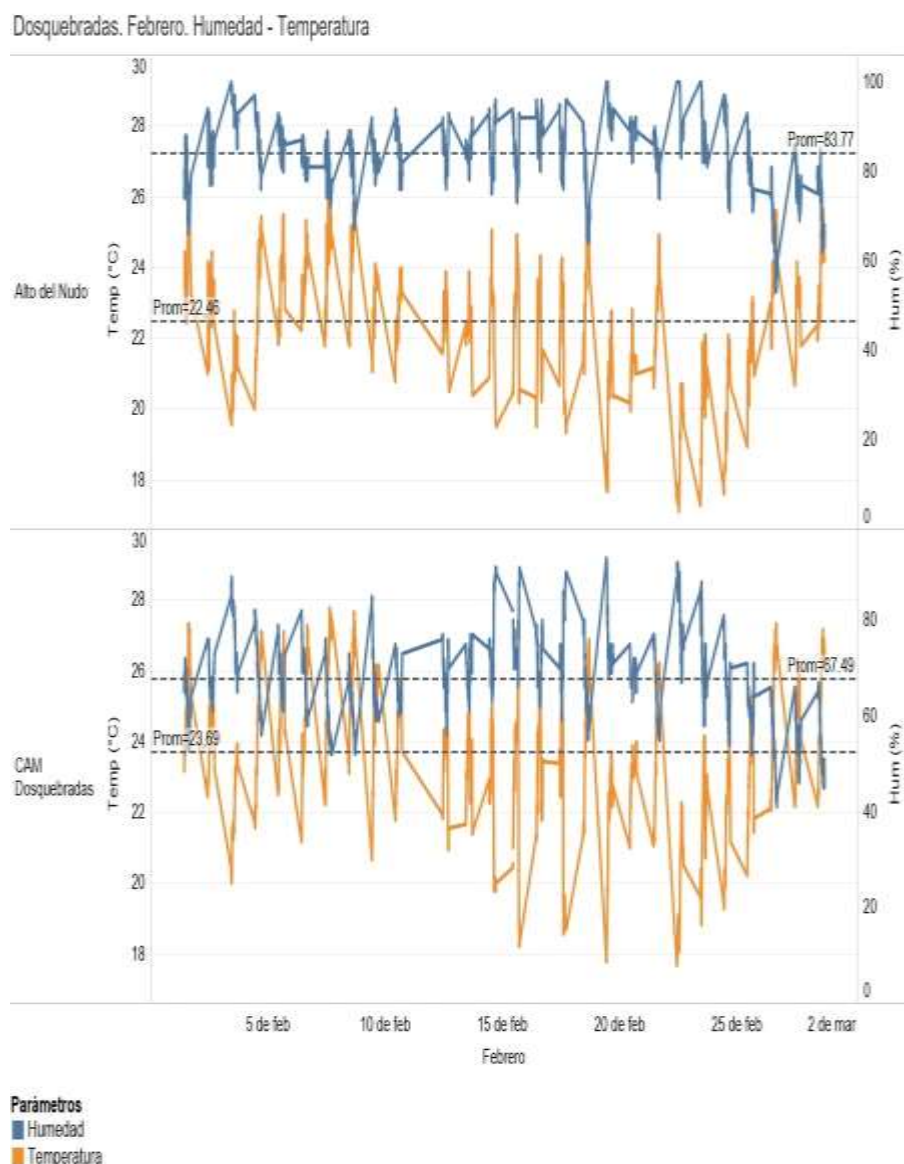


Fig. 3. Relación
Temperatura-
Humedad Relativa
Febrero
Dosquebradas

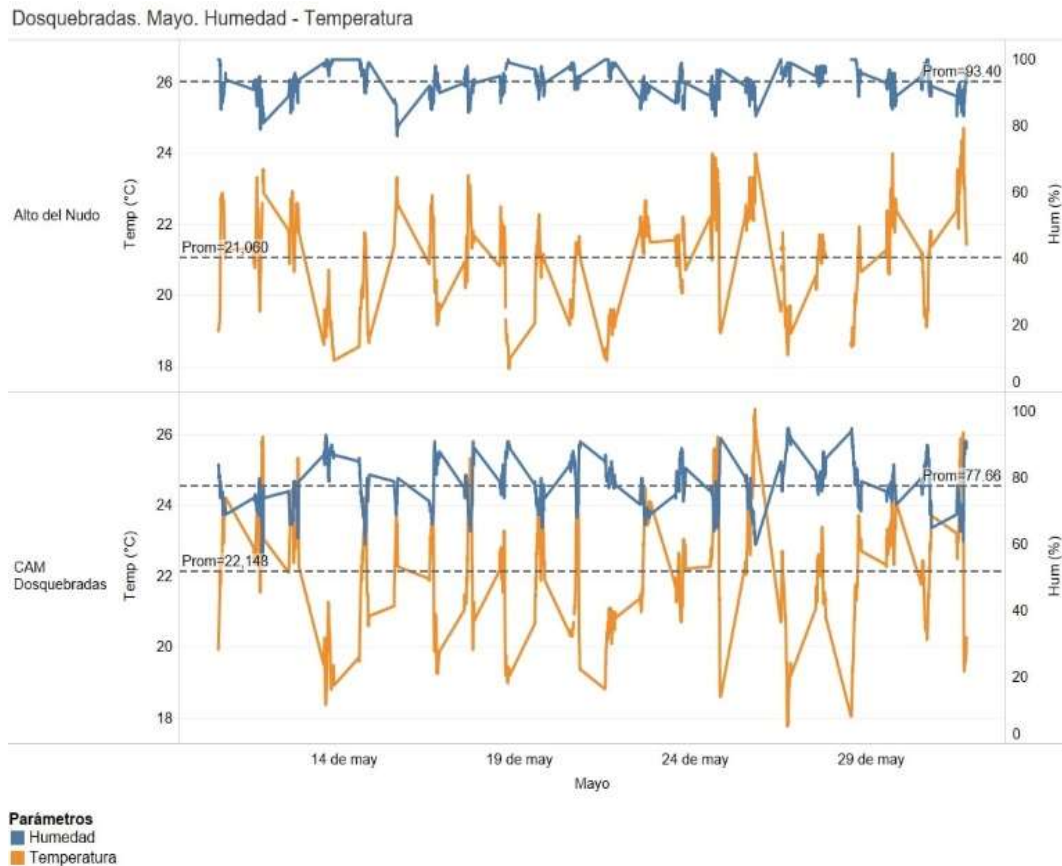


Fig. 4. Relación Temperatura- Humedad Relativa Mayo-Dosquebradas

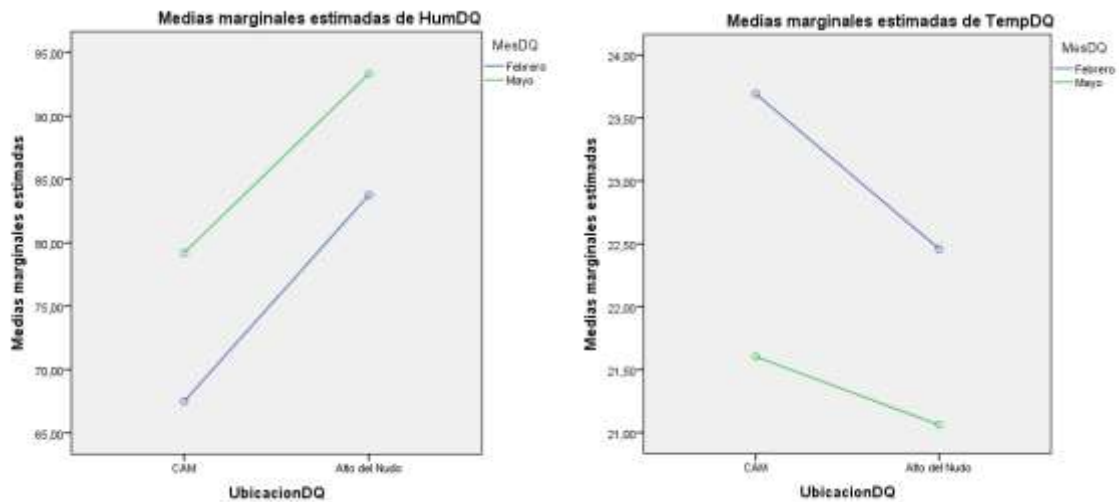


Fig 5 Medias marginales temperatura y humedad Febrero Mayo Dosquebradas

Como se puede apreciar en la Fig 3, que relaciona temperatura y humedad en el municipio de Dosquebradas en el mes de febrero, muestra unos picos de humedad

relativa del 97% en el Alto del nudo con una temperaturas de 5°C en las horas de la noche, con unas medias de 83,67% HR y 22,46 T, en tanto que en el CAM, presenta unas temperatura moderadas casi todo el mes de febrero y una humedad relativa promedio de 67%, como es de esperarse en el trópico, presentan los dos sitios de toma de datos la misma situación y es que a temperaturas más altas, la humedad relativa baja.

Para el mes de mayo Fig 4, en el alto del nudo la humedad relativa presenta un promedio de 93 %, aunque la temperatura se mantiene entre los 21 y 22,2 °C y en el CAM, la temperatura promedio baja a 22,14 °C, la humedad relativa en promedio es de 77%, contraste que se puede apreciar mejor en la Fig 5.

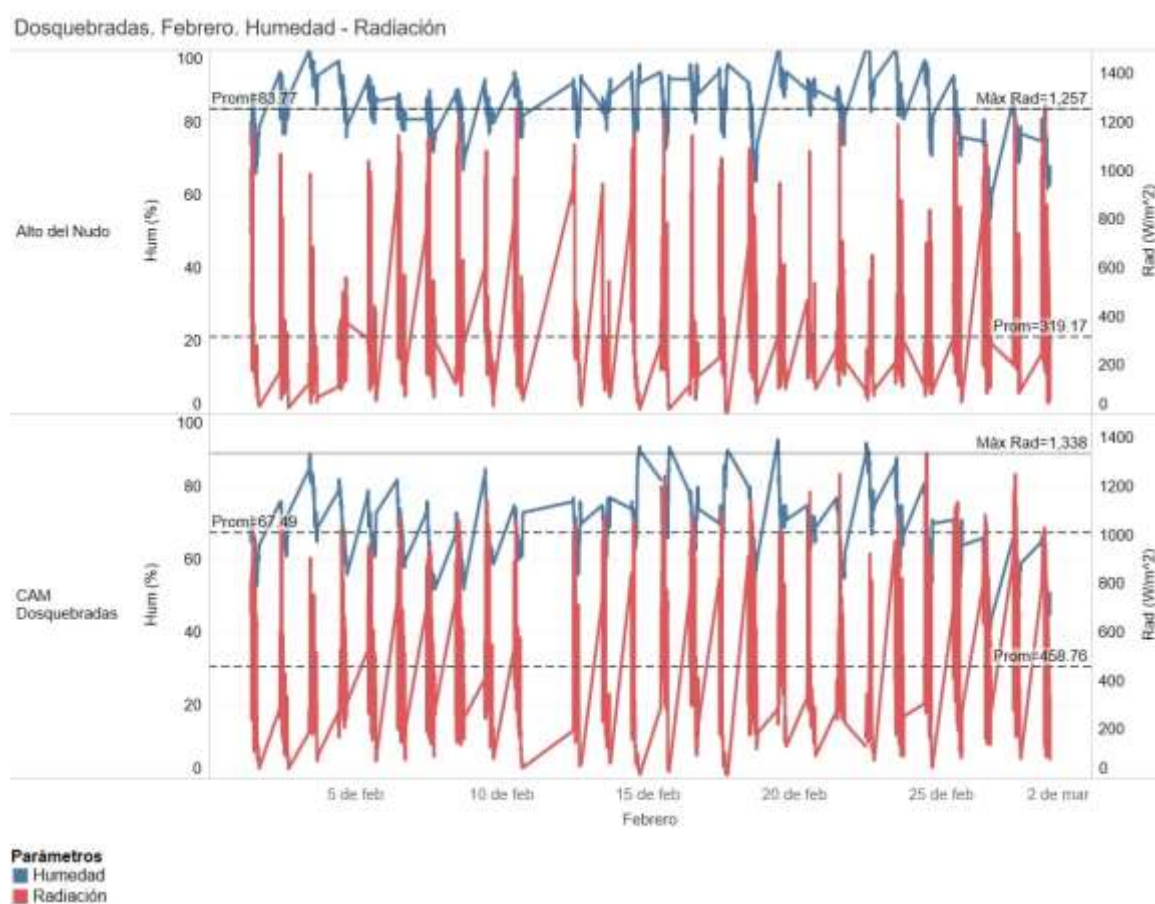


Fig 6.Relación Humedad Relativa-Radiación Solar Febrero Dosquebradas

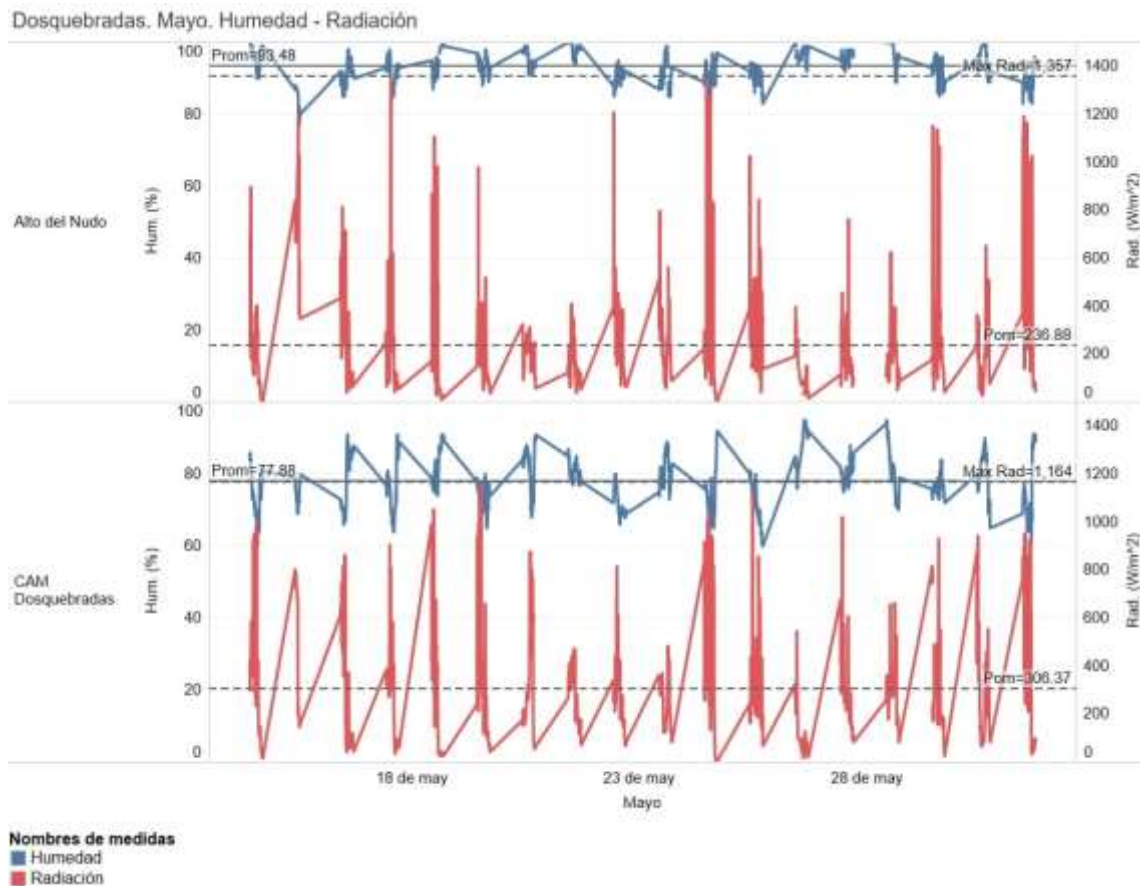


Fig 7.Relación Humedad Relativa-Radiación Solar Mayo Dosquebradas

La relación entre la humedad relativa y la radiación solar se comporta tanto en febrero Fig 6 como en el mes de mayo Fig 7 en los dos sitios de toma de datos de la misma manera, a mayor radiación solar la humedad disminuye, aunque con diferencias marcadas en la intensidad, mientras que el CAM, muestra alta incidencia de radiación solar llegando a picos de 1338 W/m^2 en el mes de febrero con una humedad relativa de 52% Fig 6 y un promedio de $458,76 \text{ W/m}^2$ mes y una humedad relativa de 67,49%, en el alto del nudo la radiación solar promedio fue de $319,17 \text{ W/m}^2$ mes, con una humedad relativa promedio de 83,17%, cabe preguntarse si estas dos condiciones son favorables para emplazamientos de energía solar térmica.

Para el mes de mayo Fig 7 se presenta en el alto del nudo un alto pico de Radiación Solar de 1357 W/m^2 pero la humedad relativa en ese día de 90% y el promedio de la radiación solar de $236,88 \text{ W/m}^2$ mes, mientras que el pico máximo de radiación solar en el CAM fue de 1157 W/m^2 el promedio fue mayor $306,37 \text{ W/m}^2$ y HR 77,88 %

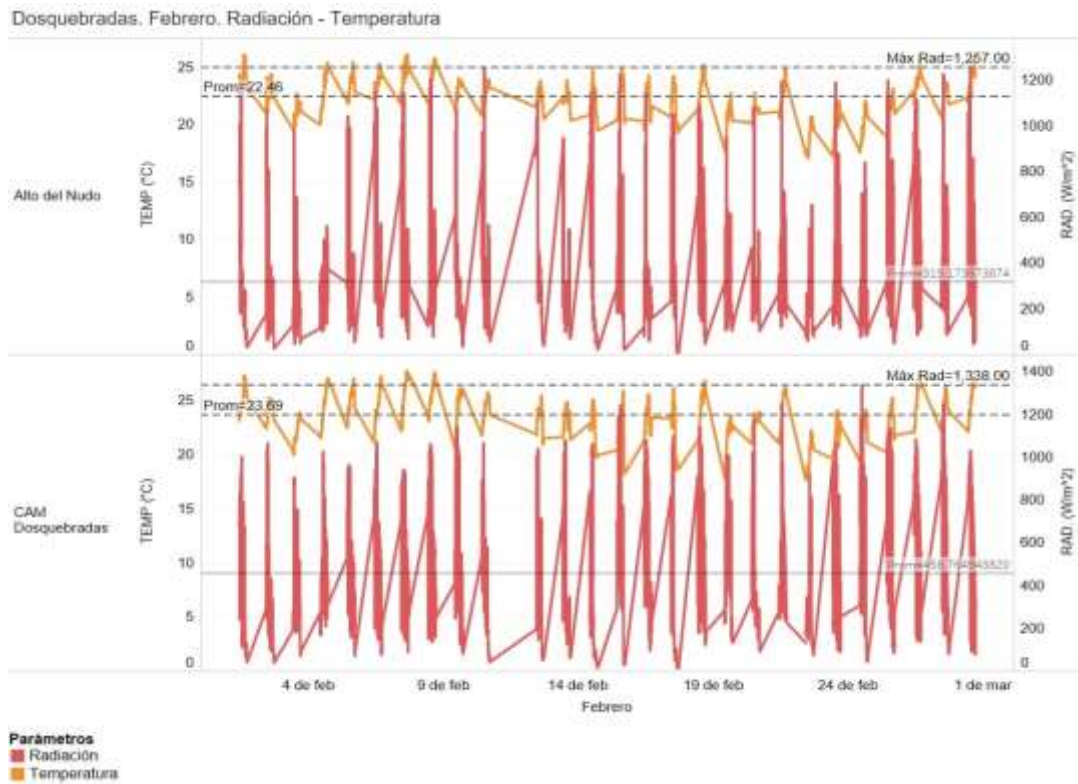


Fig 8. Relación Temperatura-Radiación Solar Febrero Dosquebradas

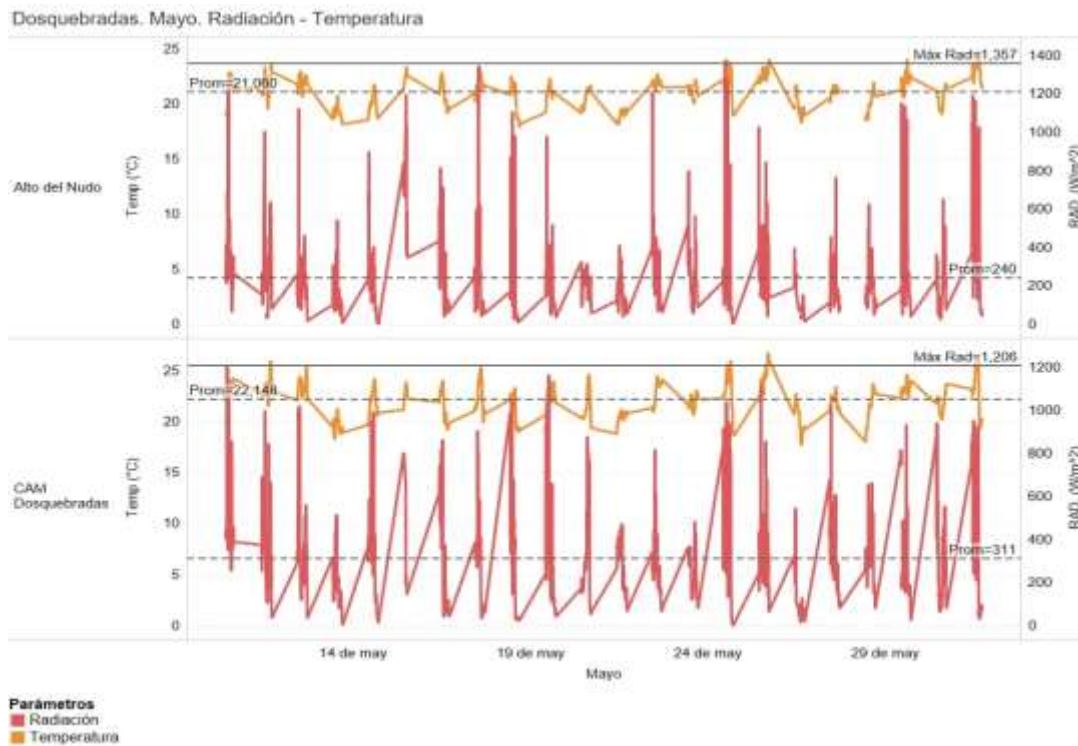


Fig 9. Relación Temperatura-Radiación Solar Mayo Dosquebradas

Como se puede ver en las Fig 8 y Fig 9 la relación que existe entre la temperatura y la radiación solar es directa a mayor radiación solar, mayor es la temperatura y al disminuir la radiación solar también disminuye la temperatura, no obstante se presenta para el mes de mayo Fig 9, una Radiación solar de 1357 W/m^2 en el alto del nudo a una temperatura de 23°C , mucho más alta que en el mes de febrero Fig 8, de 1257 W/m^2 a una temperatura de 25°C , esto se puede explicar por la nubosidad relacionado con la altura sobre el nivel del mar en el alto del nudo de 2002 msnm.

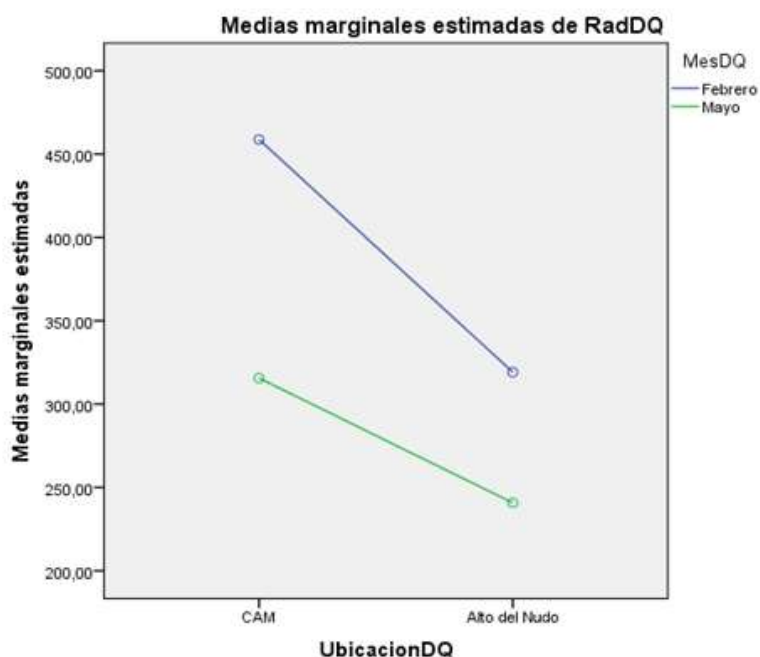


Fig 10. Media marginal Radiación solar Febrero y Mayo Dosquebradas

Se puede observar en la Fig 10, que en general tanto para los meses de febrero y mayo la radiación solar es mayor en el CAM que en el Alto del Nudo y que la máxima Radiación Solar promedio del mes de mayo es equiparable a la radiación solar promedio, mínima del mes de febrero.

Para los análisis estadísticos del municipio de Dosquebradas se consideró la prueba de normalidad de Kolmogorov-smirnov (la cual se debe interpretar en caso de tener más de 50 datos, como es el caso), que muestra una significancia menor a 0,05 y por lo tanto los datos de las variables dependientes temperatura, humedad y radiación solar, en los grupos formados por las variables independientes (factores) ubicación y mes, no tienen una distribución normal, ver Anexo 1. análisis estadístico municipio de Dosquebradas

Dado que no se cumple el supuesto de normalidad para los datos medidos en **Dosquebradas**, se realizó el análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) y con base en el resultado se observó que si hay diferencias significativas entre los grupos formados por la variable independiente ubicación (con sus dos niveles CAM y Alto del nudo) y dicho análisis se realizó para las 3 variables dependientes temperatura, humedad y radiación.

Tabla 1 Prueba de Kruskal –Wallis para CAM y Alto del Nudo de Temp, Hum y Rad

Resumen de prueba de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de TempDQ es la misma entre las categorías de UbicacionDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de HumDQ es la misma entre las categorías de UbicacionDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de RadDQ es la misma entre las categorías de UbicacionDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

Con base en el resultado podemos decir que hay diferencia significativa entre los dos grupos y para cada variable dependiente.

Se realizó entonces el análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-wallis de 1 vía) para saber si hay diferencias significativas entre los dos grupos formados por el factor “Mes” para sus dos niveles (febrero y mayo), y la prueba se solicitó para las tres variables

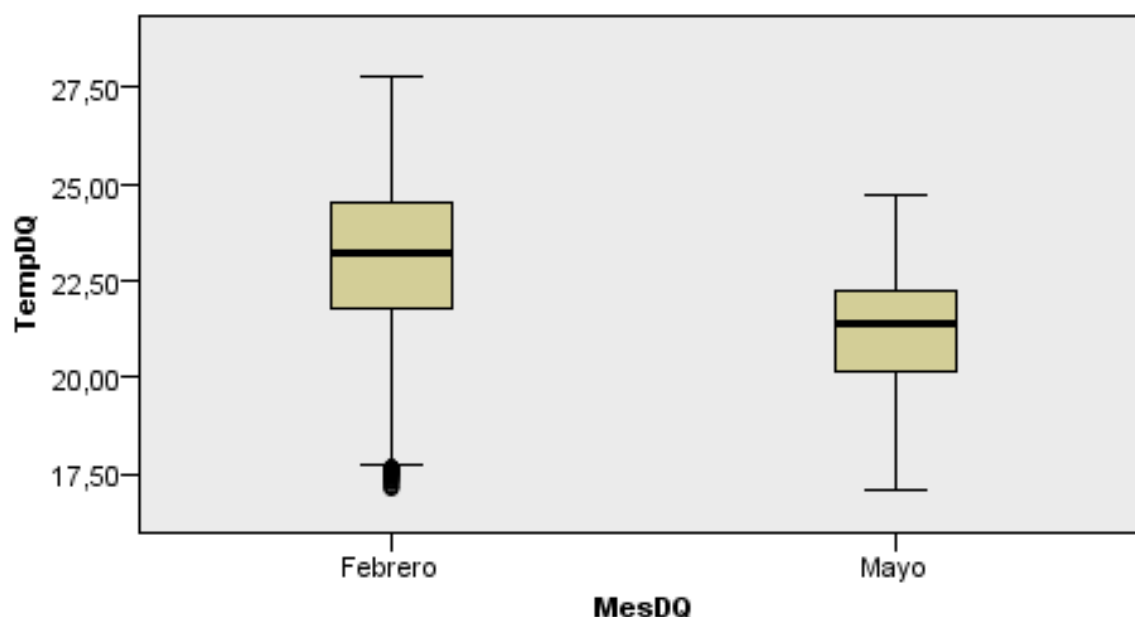
dependientes: TemperaturaDQ, HumedadDQ y RadiacióDQ. El resultado muestra que si hay diferencias significativas entre los dos meses.

Tabla 2 Resultados Kruskal–Wallis para Temperatura, humedad y radiación en febrero y mayo en Dosquebradas

Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de TempDQ es la misma entre las categorías de MesDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de HumDQ es la misma entre las categorías de MesDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de RadDQ es la misma entre las categorías de MesDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

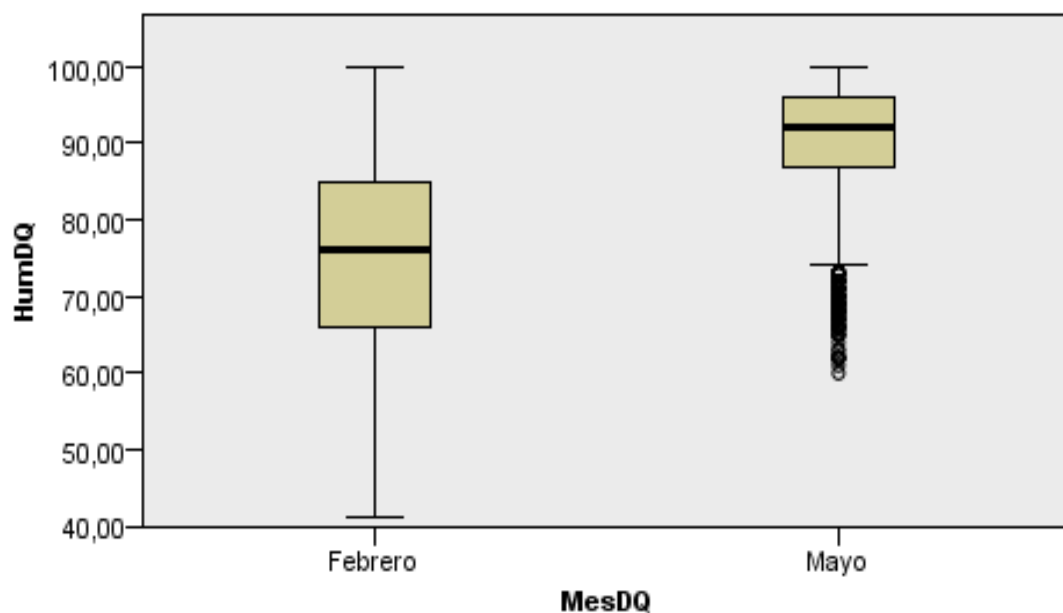
Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05



N total	6.769
Estadístico de contraste	1.402,653
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

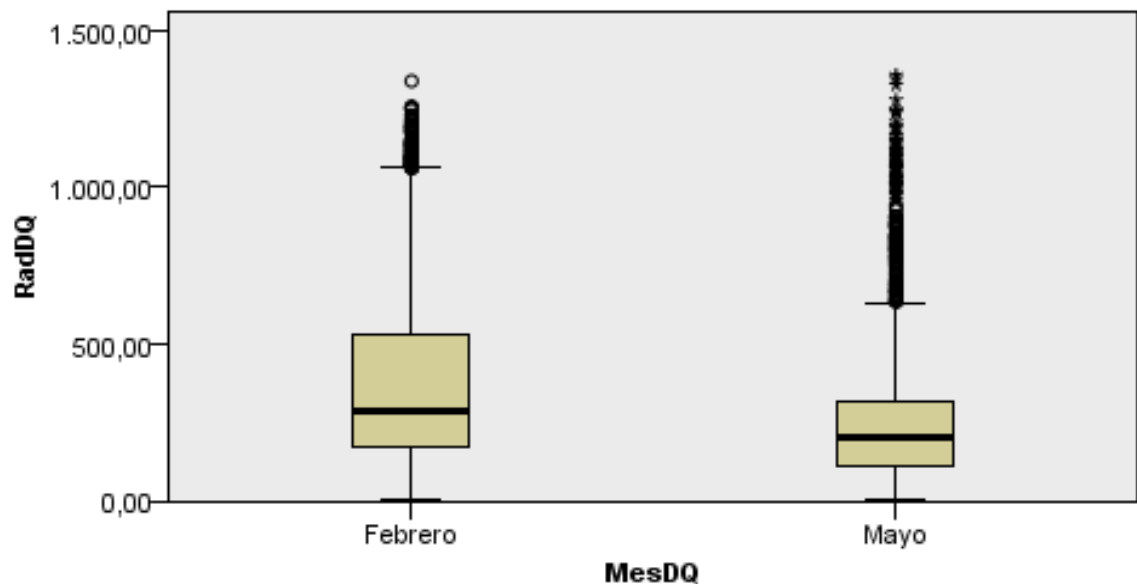
Fig 11 Prueba Kruskal-Wallis Temperatura Dosquebradas febrero y mayo



N total	6.769
Estadístico de contraste	2.091,623
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

Fig 12 Prueba Kruskal-Wallis Humedad Dosquebradas febrero y mayo



N total	6.767
Estadístico de contraste	369,926
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

Fig 13 Prueba Kruskal-Wallis Radiación Dosquebradas febrero y mayo

Los resultados que se obtuvieron para Pereira, incluido Cortaderal, zona de páramo del municipio de Santa Rosa de Cabal, son los siguientes, también obtenidos con Tableau, los gráficos y las comparaciones y pruebas de ANOVA no paramétricas con SPSS

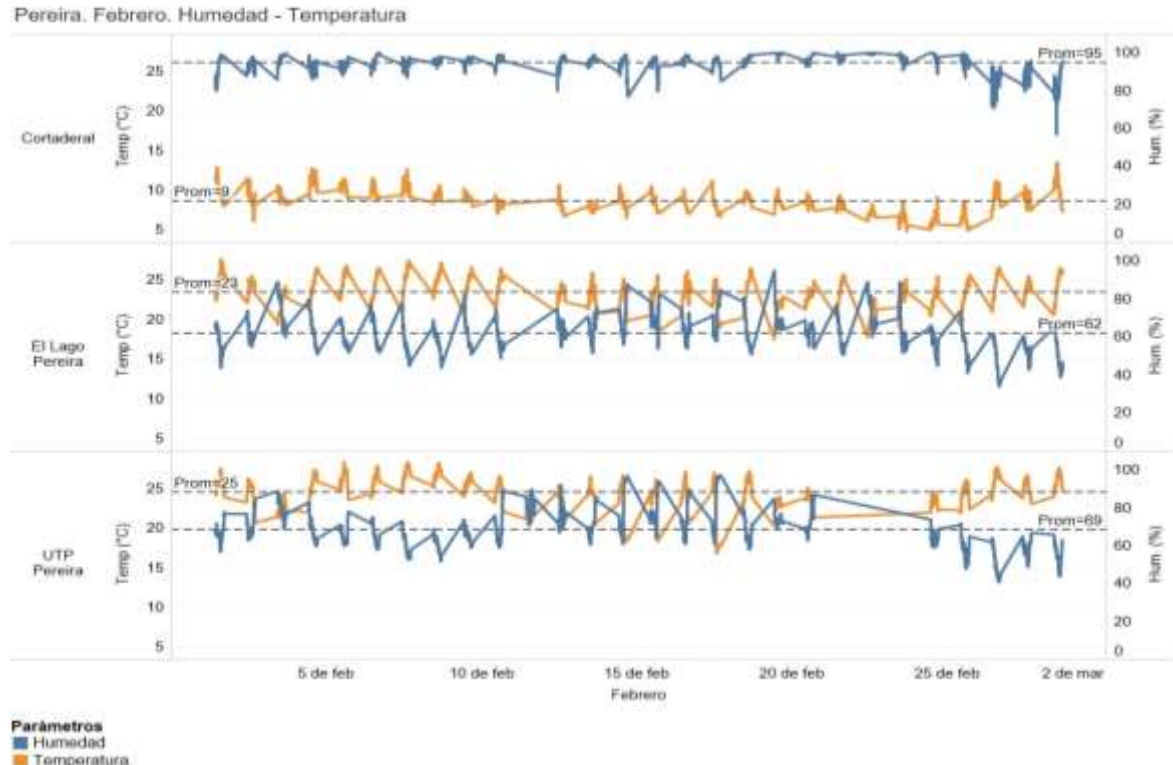


Fig. 14 Relación Temperatura –Humedad Relativa Febrero Pereira

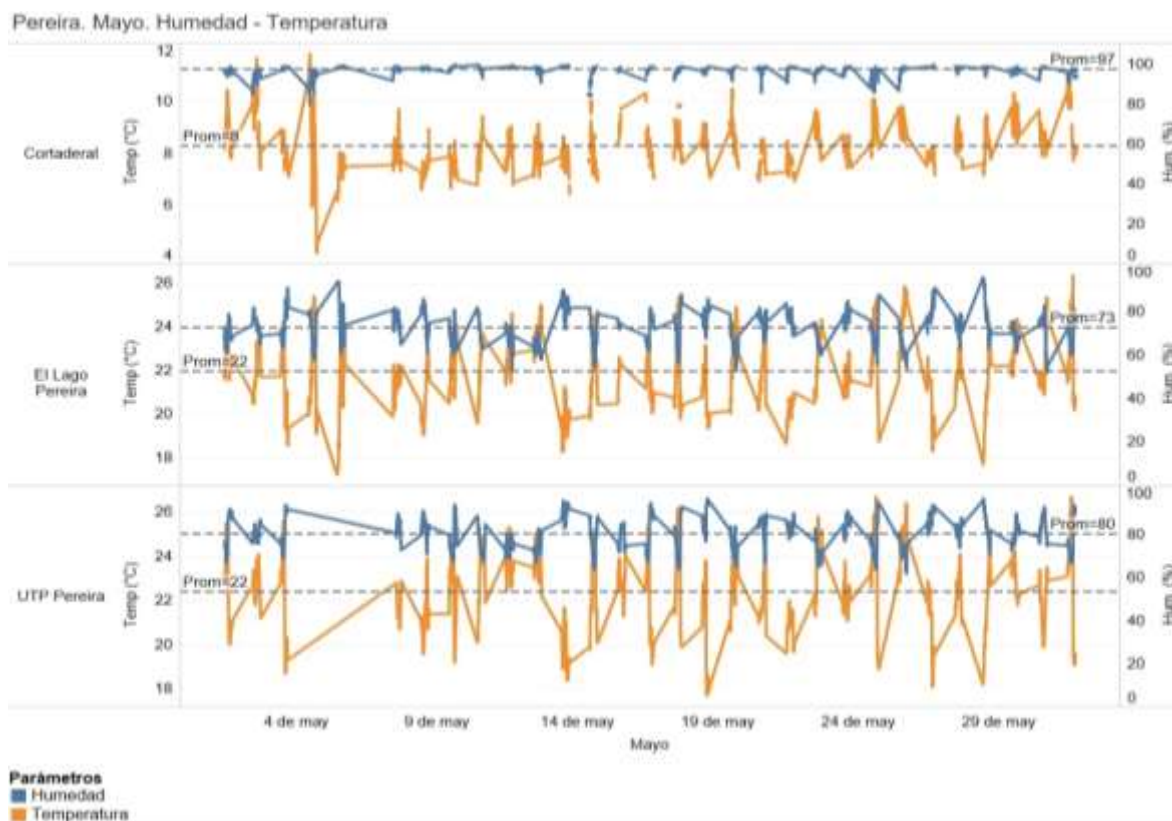


Fig. 15 Relación Temperatura –Humedad Relativa Mayo Pereira

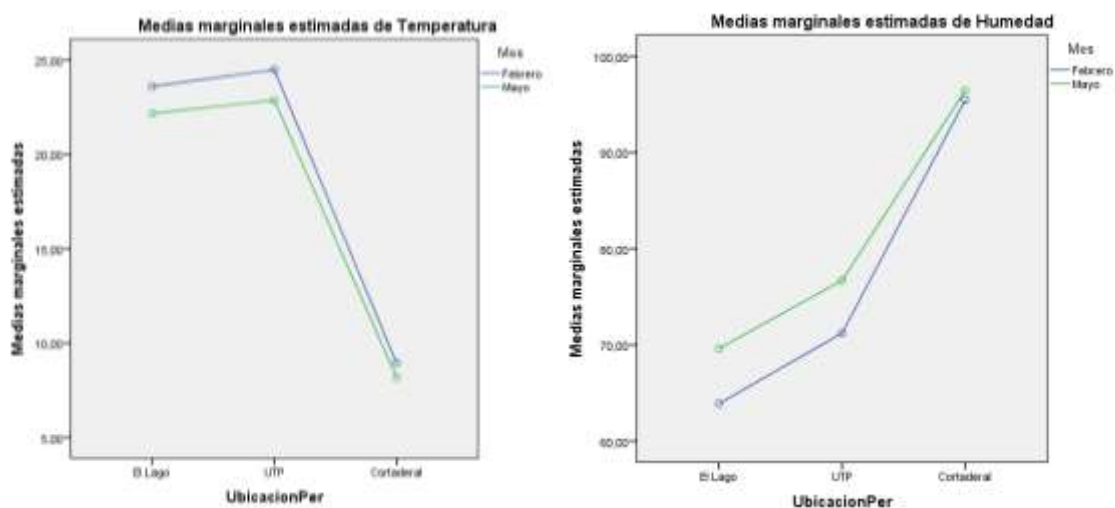


Fig 16. Medias marginales Temperatura y Humedad- Febrero y Mayo Pereira

Las figuras 14,15 y 16 muestran un comportamiento similar en los sitios del Lago y la UTP, con diferencias entre los meses de febrero y mayo tanto en temperatura como humedad, mientras el comportamiento de la temperatura en Cortaderal, para los dos

meses de febrero y mayo, presentan una diferencia de un grado centígrado entre los promedios de los dos meses, 8°C feb y 9°C mayo y una diferencia de 2 % en los promedios de humedad, 95% en feb y 97% en mayo, ninguna de las dos condiciones son favorables para procesos de secado siendo la de mayor cuidado la humedad, que en la medida que ésta se acerca a 100%, esta mostrando la poca capacidad que tiene el ambiente para absorber más humedad.

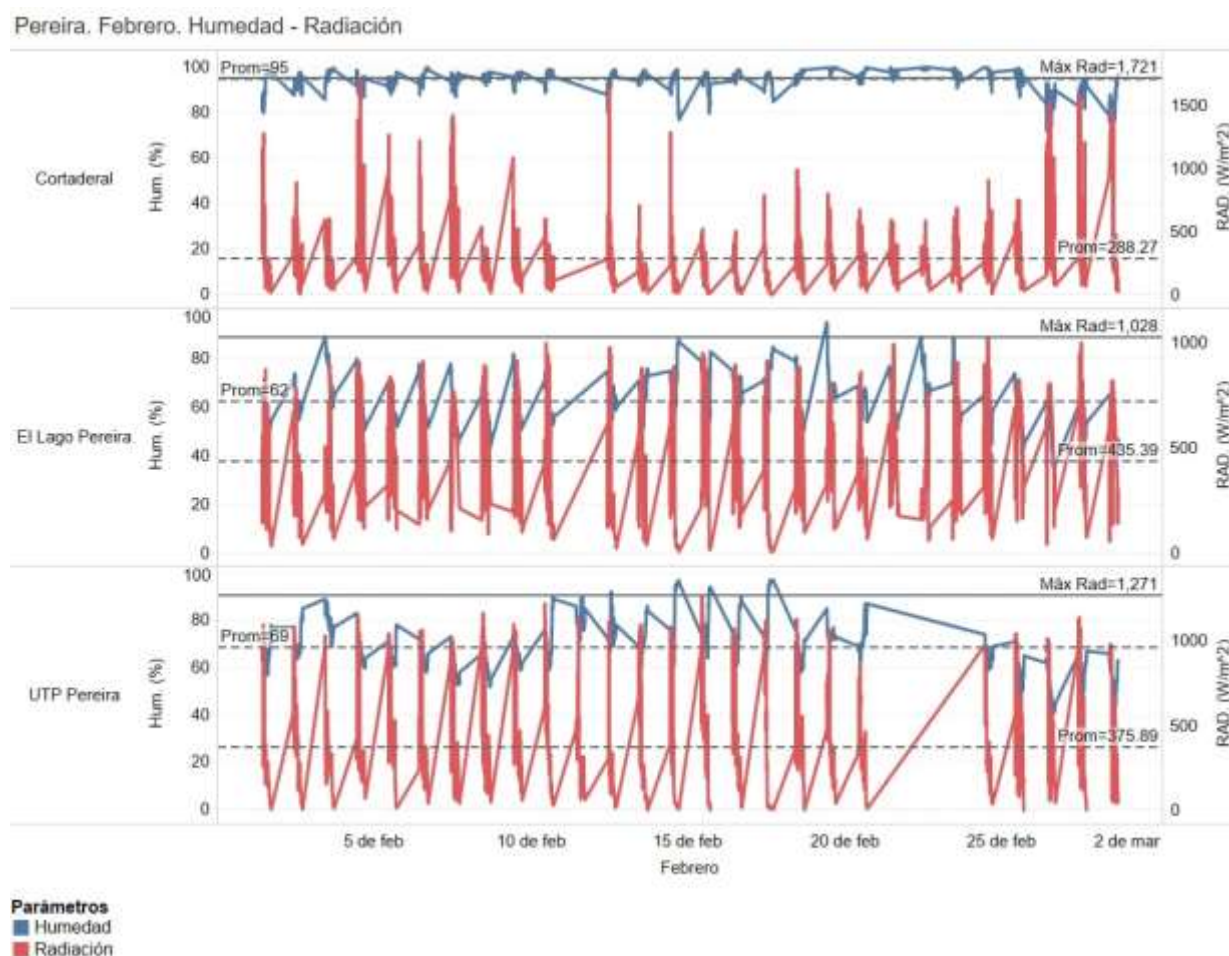


Fig. 17 Relación Humedad Relativa-Radiación Solar Febrero Pereira

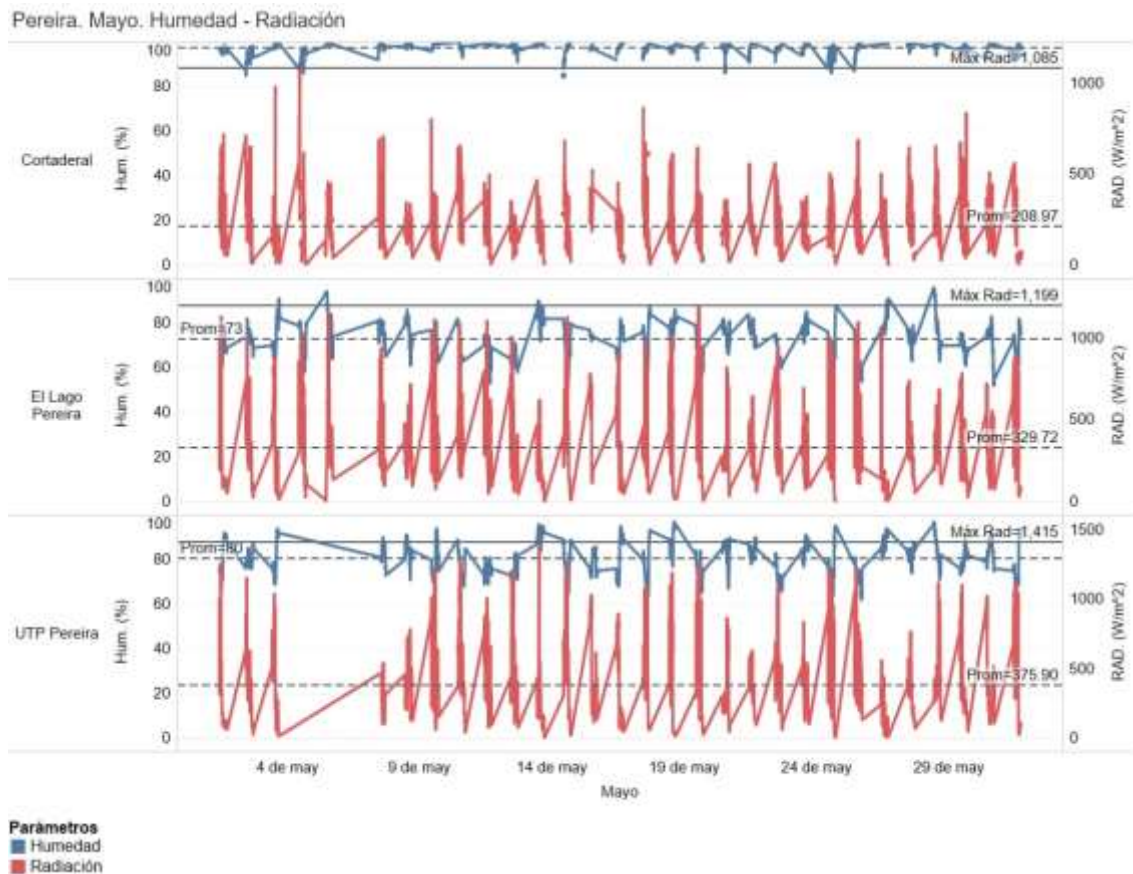
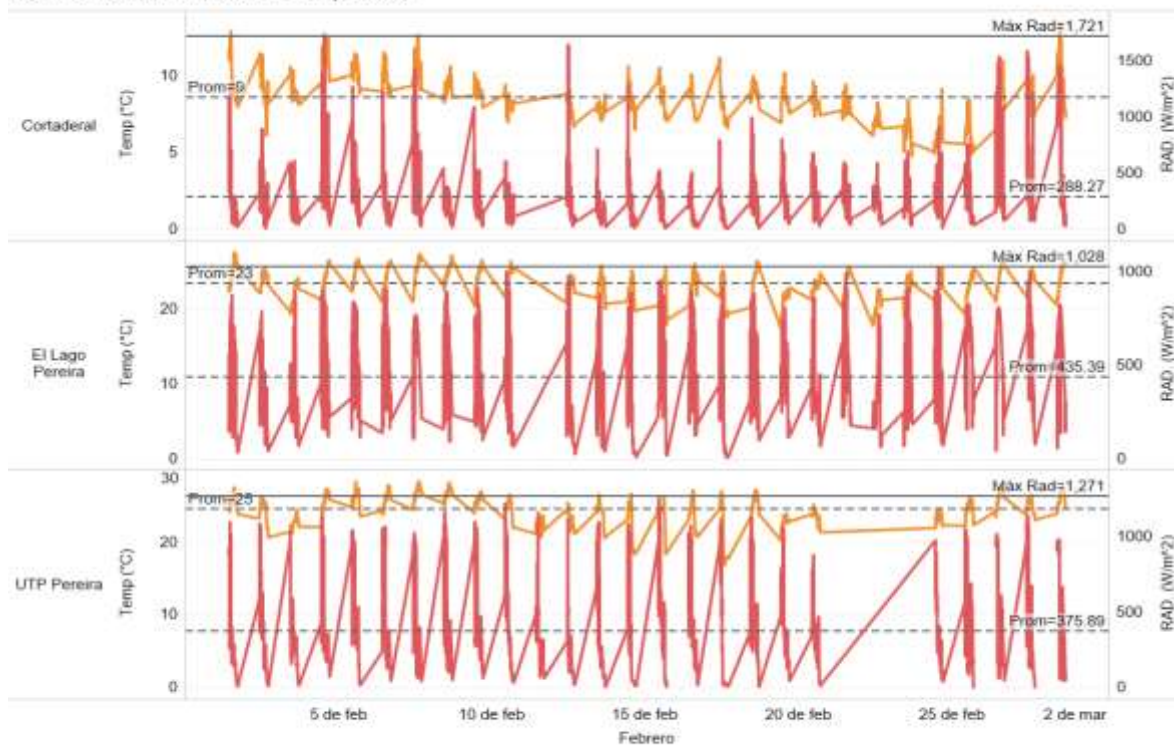


Fig. 18. Relación Humedad Relativa- Radiación Solar Mayo Pereira

En las figuras 17 y 18, muestran el comportamiento para los meses de febrero y mayo de la Radiación solar con respecto a la humedad, que presenta un evento a resaltar y es que el mes de febrero Cortaderal marca el mayor pico de radiación solar, de todos los datos recolectados 1721 W/m^2 , si esta fuera la única variable a considerar para la aplicación de la energía solar térmica se podría afirmar que es el emplazamiento más adecuado, pero este pico muestra que en ese instante la humedad relativa estaba en el promedio del mes de febrero de 95%, es decir, las condiciones climáticas no permitirían absorber la humedad de los productos, por el contrario, en el instante que desaparezca la radiación solar los productos, reabsorben la humedad. Es de mencionar que también presenta un promedio mes de radiación solar de 288 W/m^2

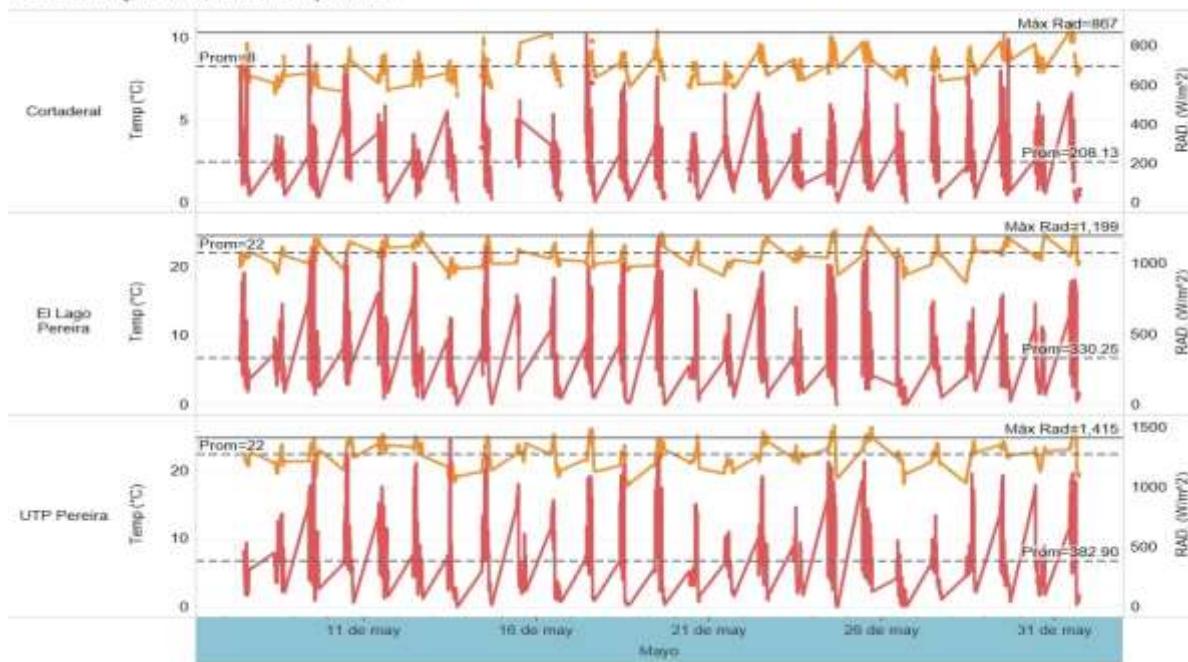
Pereira. Febrero. Radiación - Temperatura



Parámetros
 ■ Radiación
 ■ Temperatura

Fig. 19. Relación Temperatura- Radiación Solar Febrero Pereira

Pereira. Mayo. Radiación - Temperatura



Parámetros
 ■ Radiación
 ■ Temperatura

Fig 20 Relación Temperatura- Radiación Solar Mayo Pereira

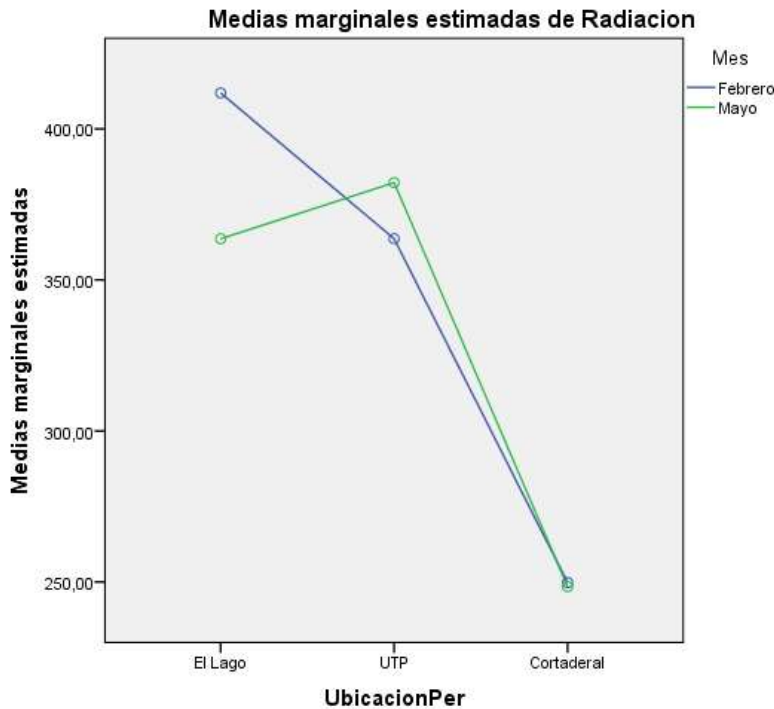


Fig 21 Medias marginales Radiación Solar –Febrero y Mayo Pereira

En las figuras 19,20 y 21 en las cuales se muestra la variación de temperaturas con relación a la Radiación solar, se constata lo esperado y es que a mayor radiación solar, la temperatura también es mayor, situación que se presenta en todos los casos, sin embargo llama la atención que el promedio mes para la UTP de Radiación Solar para mayo 382,9 W/m² es mayor que el promedio del mes de febrero 375,89 W/m²

La prueba de normalidad (Datos Pereira) de Kolmogorov-Smirnov muestra una significancia menor a 0,05 y por lo tanto los datos de las variables dependientes temperatura, humedad y radiación (Pereira) en los grupos formados por las variables independientes (factores) ubicación y mes, no tienen una distribución normal como se muestra en el Anexo 1. Denominado: Análisis estadístico, ver para la ciudad de Pereira.

Dado que no se cumple el supuesto de normalidad se realizó el análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) y con base en el resultado se observa que si hay diferencias significativas entre los grupos formados por la variable independiente

ubicación y esto se realizó para las variables dependientes temperatura, humedad y radiación. Tabla 3

Tabla 3 Resultados prueba de Kruskal –Wallis para Pereira de temperatura, humedad y Radiación

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Temperatura es la misma entre las categorías de UbicacionPer.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar hipótesis nula.
2	La distribución de Humedad es la misma entre las categorías de UbicacionPer.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar hipótesis nula.
3	La distribución de Radiacion es la misma entre las categorías de UbicacionPer.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

Se realizó también el ANOVA no paramétrico (Kruskal-Wallis) para el factor “Mes” con sus dos niveles (febrero y mayo) para los datos de temperatura, humedad y radiación en **Pereira** y los resultados se muestran a continuación en la Tabla 4

Se observa que para las variables temperatura y humedad hay diferencia significativa entre los grupos formados por los meses de febrero y mayo pero que para la variable radiación no hay diferencia significativa $0,507 > 0,05$.

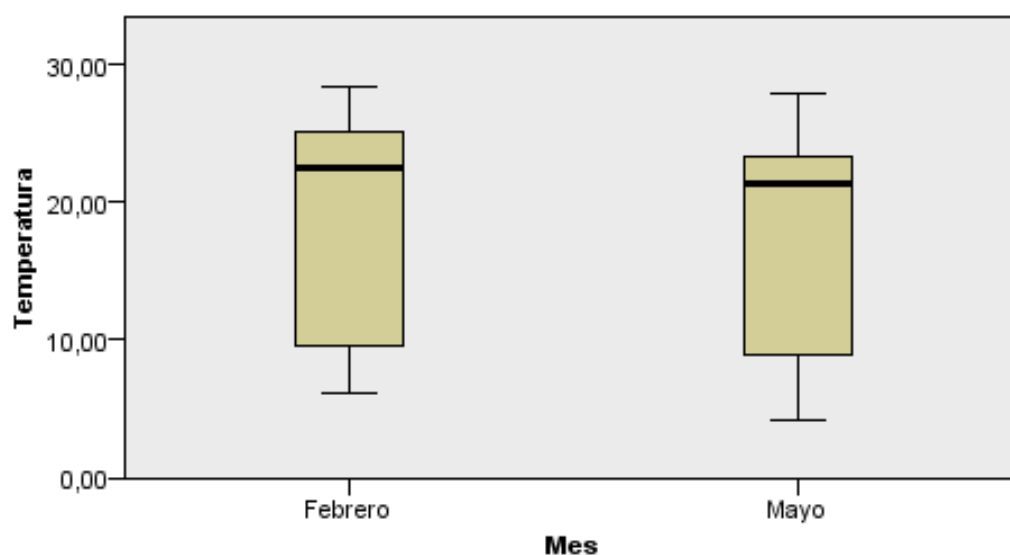
Tabla 4 Resultados Kruskal–Wallis para Temperatura, Humedad y Radiación en febrero y mayo en Pereira.

Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Temperatura es la misma entre las categorías de Mes.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de Humedad es la misma entre las categorías de Mes.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de Radiación es la misma entre las categorías de Mes.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,507	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

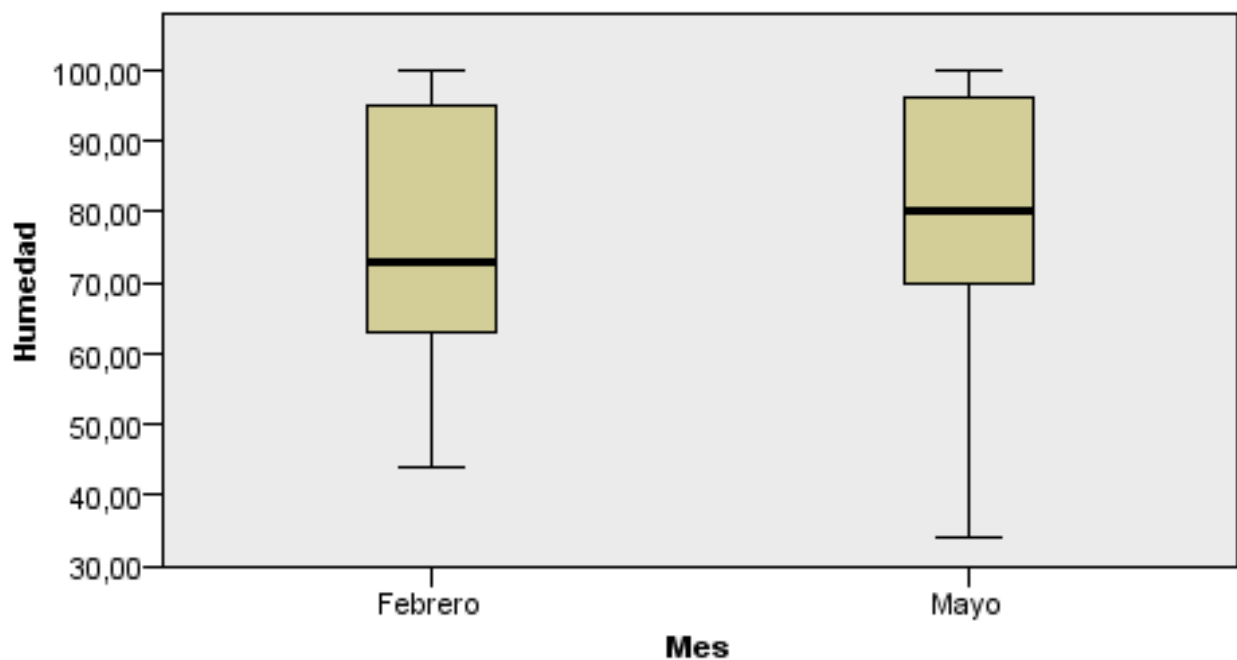


N total	13.349
Estadístico de contraste	370,729
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

Fig 22 Prueba Kruskal-Wallis Temperatura Pereira febrero y mayo

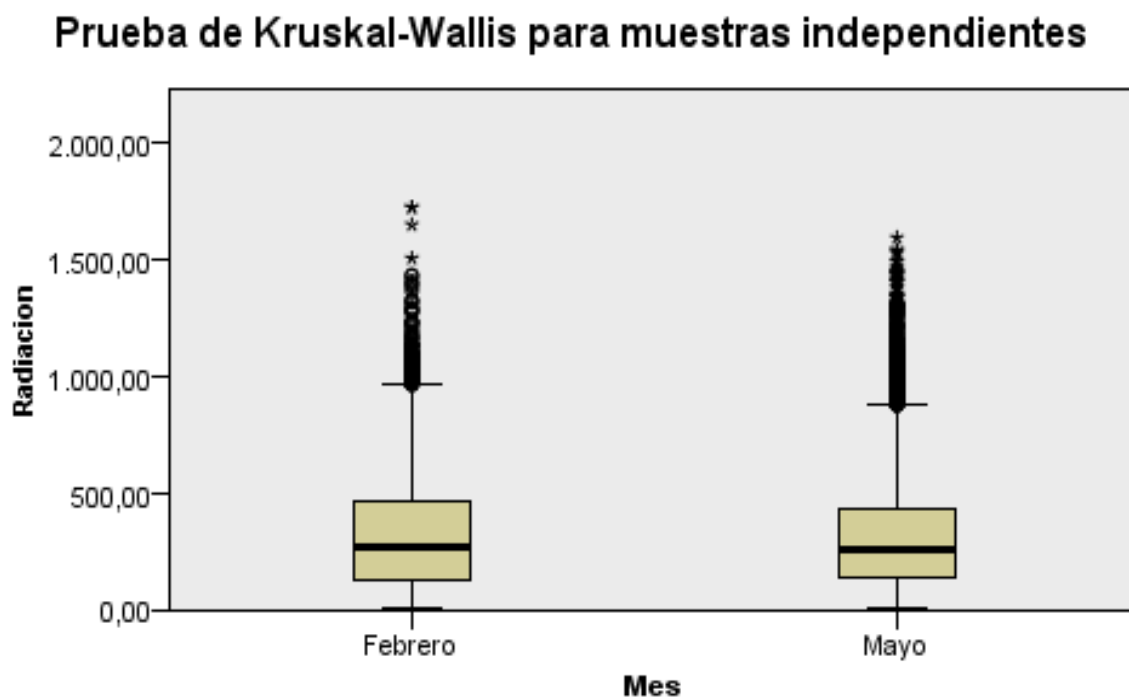
Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	13.349
Estadístico de contraste	246,496
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

Fig 23 Prueba Kruskal-Wallis Humedad Pereira febrero y mayo



N total	13.337
Estadístico de contraste	,440
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,507

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

Fig 24 Prueba Kruskal-Wallis Radiación Pereira febrero y mayo

2.4.2 Resultados Potencial de secado

Para calcular el potencial de secado del aire que proporcionan las condiciones ambientales como temperatura y humedad relativa se emplearán los conceptos para expresar el contenido de vapor de una masa de aire. Con los datos de temperatura ambiente calculamos la presión de saturación e y con esta la presión parcial de vapor a partir de la HR del lugar

Humedad Relativa

$$HR = \frac{m_v}{m_{v,sat}} \times 100 = \frac{e}{E} \times 100 \quad (14)$$

e : Presión parcial de vapor a una temperatura T en hPa

E : Presión de saturación a la temperatura T en hPa

HR Humedad Relativa en (%)

Razón de Mezcla kg vapor/kg de aire seco (kg. kg^{-1})

$$r = \frac{m_v}{m_d} \quad r = \frac{M_v}{M_d} \frac{e}{p-e} = 0.622 \frac{e}{p-e} \quad (15)$$

Humedad Específica **W** kg vapor/kg total (kg.kg⁻¹)

$$W = \frac{m_v}{m_v + m_d} \quad W = \frac{r}{1 + r} \quad (16)$$

Humedad absoluta

$$\rho_v = \frac{m_v}{Volumen} = \frac{e}{R_v T} = \frac{M_v e}{R T} \quad (17)$$

$$\frac{M_v}{R} = 2.165 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg} \cdot \text{K}}{\text{N} \cdot \text{m}} \quad \rho_v = 2.165 \cdot 10^{-3} \frac{e}{T} \quad (18)$$

$e \rightarrow \text{Pa} \quad T \rightarrow \text{K}$

$\rho_v \rightarrow \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Para efecto de los cálculos, se asume que el flujo de aire que entra al sistema \dot{m} es de 1 kg/s y el área A del deshidratador es de 1 m² sin calentamiento previo a la entrada de la cámara de secado. Con las variables de entrada, temperatura T, humedad relativa HR, presión P promedio mes y altura a través del programa señalado, se calculó el calor latente de vaporización h_v , la humedad específica, a través del software de cálculo EES Academic Comercial E/Saturación adiabática, arrojando los resultados que aparecen en la Tabla 7 y con los cuales se procedió a realizar la evaluación del Potencial total de secado P_T , cuyo resumen se presenta en la Tabla 8, en el que se empleó la ecuación (8) para evaluar el potencial de secado por la radiación solar P_{RS} , la ecuación (12) para evaluar el potencial de secado del aire P_a y la ecuación (13) para calcular la potencia total de secado P_T

Tabla 5 Resultados obtenidos de las estaciones y análisis psicométrico para Potencial total

Lugar	Mes	Temp °C	HR %	Presión bar	Temp de saturación °C(TS)	Altitud (m.s.n.m.)	Humedad Específica W_a (g aire húmedo /g aire seco)	Humedad a temp de saturación W_s(g aire húmedo /g aire seco)	m_w (g aire húmedo /g aire seco)	Calor latente de vaporización kJ/kg (q_v)
UTP Pereira	Febrero	25	69	1,003	23,78	1450	0,001359	0,001833	0,004738	2445
UTP Pereira	Mayo	22	80	1,006	21,32	1450	0,001311	0,001573	0,0002619	2450
El Lago Pereira	Febrero	23	62	0,855	21,47	1415	0,001270	0,001869	0,0005984	2450
El Lago Pereira	Mayo	22	73	0,858	20,37	1415	0,001403	0,001805	0,0004024	2451
Cortaderal	Febrero	9	95	0,746	8,887	3700	0,0009107	0,000951	0,00004082	2480
Cortaderal	Mayo	8	97	0,749	7,933	3700	0,0008654	0,008882	0,00002284	2482
El CAMD/das	Febrero	23,69	67	1,005	22,48	1448	0,001217	0,00169	0,0004726	2448
El CAMD/das	Mayo	22,14	78	1,007	21,39	1448	0,001288	0,001578	0,0002901	2450
Alto del nudo D/das	Febrero	22,48	84	0,803	21,82	2002	0,001777	0,002033	0,0002587	2449
Alto del nudo D/das	Mayo	21	93	0,806	20,72	2002	0,00179	0,001893	0,0001028	2452

Tabla 6 Potencial total de secado para los sitios de estudio

Lugar	Mes	Pa Watt	P _{RS} Watt	PT Watt
UTP Pereira	Febrero	1158	375,89	1533,89
UTP Pereira	Mayo	641,7	382,9	1024,60
El Lago Pereira	Febrero	1466	435,39	1901,39
El Lago Pereira	Mayo	986,4	330,25	1316,65
Cortaderal	Febrero	101,2	288,27	389,47
Cortaderal	Mayo	56,69	208,13	264,82
El CAMD/das	Febrero	1157	458,76	1615,76
El CAMD/das	Mayo	710,9	306	1017,27
Alto del nudo D/das	Febrero	626,4	319,17	945,57
Alto del nudo D/das	Mayo	252	236,88	488,88

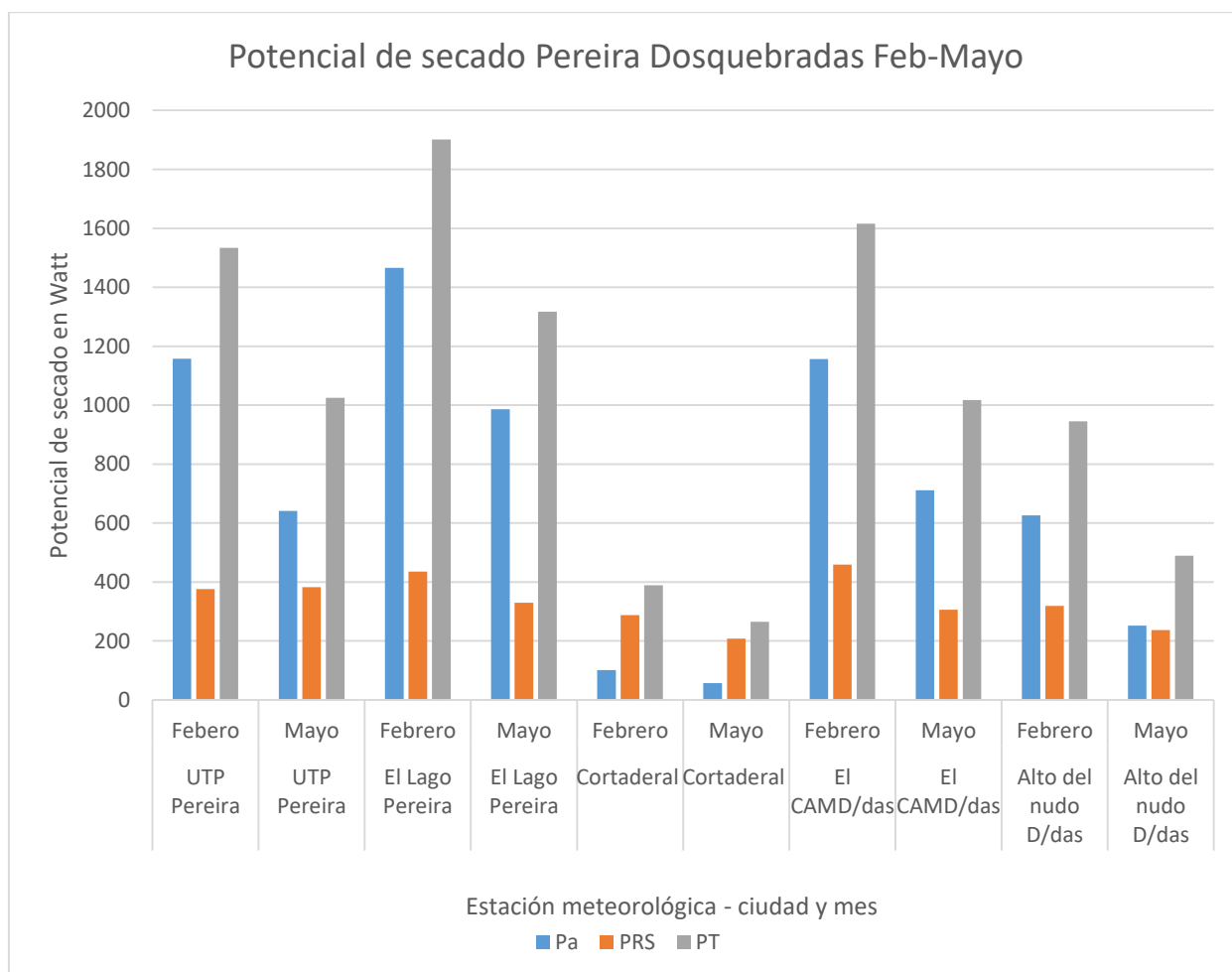


Fig 25 Potencial de secado Pereira y Dosquebradas meses de Feb y Mayo en Watts

Podemos ver en la Fig 25, como el potencial asociado a las condiciones ambientales, temperatura y humedad relativa, tiene una alta contribución al potencial total de secado, es importante reconocer que la incidencia de la radiación solar para los sitios estudiados si bien no es nada despreciable, si se considera como moderada, esto se podría explicar principalmente por la humedad relativa alta si se compara con sitios donde no existe vegetación abundante, caso de las estaciones del Lago y el CAM, que se muestran con condiciones favorables para el empleo de la energía solar térmica.

De otro lado se muestra claramente una diferencia entre los meses de febrero y mayo sobre todo en el potencial de secado total de los dos meses Tabla 5, se explica por los históricos de lluvias en la región andina colombiana, que tiene un régimen bimodal de lluvias, coincidiendo la primera con el mes de mayo y donde se presenta la mayor nubosidad y altas precipitaciones.

Es de resaltar que la estación de Cortaderal que se tomó como referente por las condiciones extremas que presenta, se comportó como se esperaba, por un lado mostrando el mayor pico de radiación solar, pero con un potencial de secado total, que muestra esta ubicación como no apta para el empleo de deshidratadores solares para conservar alimentos.

Otra manera de observar el comportamiento de las variables ambientales ya mencionadas es por medio de la construcción de mapas de temperatura, humedad, radiación solar y potencial de secado para los meses de febrero y mayo, que permiten ver toda la información de manera comparativa, de tal forma que los diseñadores o quienes quieran implementar proyectos de energía solar térmica puedan tomar decisiones de inversión, dependiendo del lugar de emplazamiento. Adicionalmente también es posible tener una idea del potencial total de secado según la ubicación.

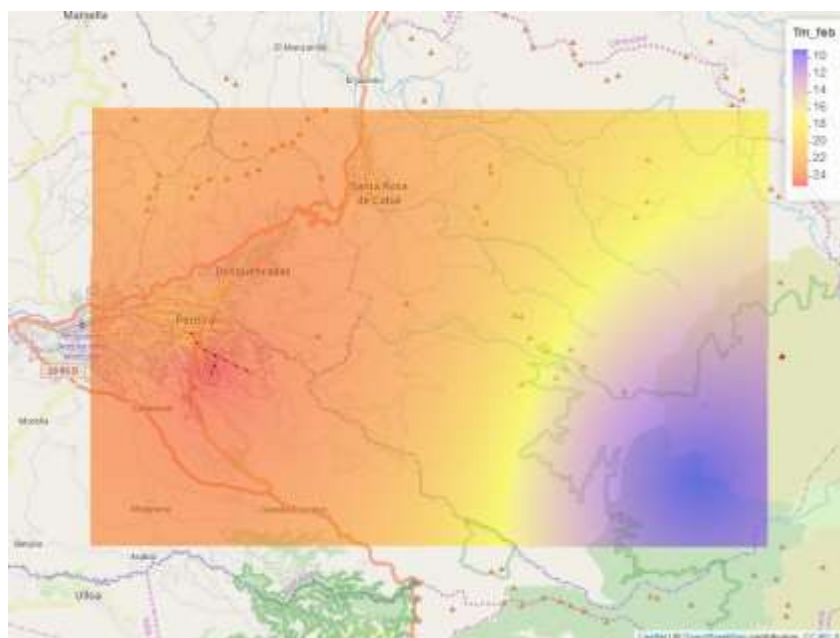


Fig 26. Mapa de temperatura para el mes de febrero en el oriente de Risaralda

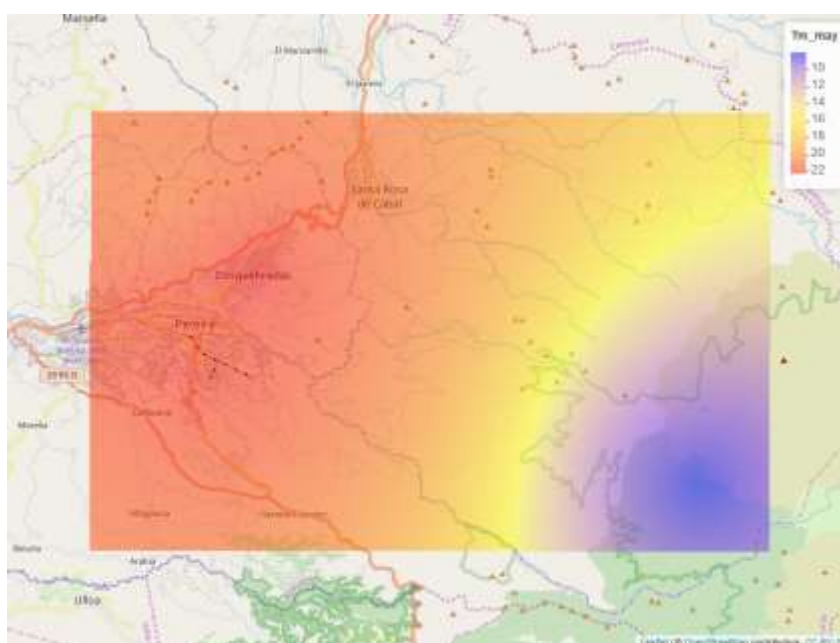


Fig 27. Mapa de temperatura para el mes de mayo en el oriente de Risaralda

Las figuras 26 y 27 muestran pequeñas variaciones, lo cual es de esperarse en un país que no tiene estaciones, aun así, esa información es muy importante en la evaluación de potencial total de secado con energía solar.

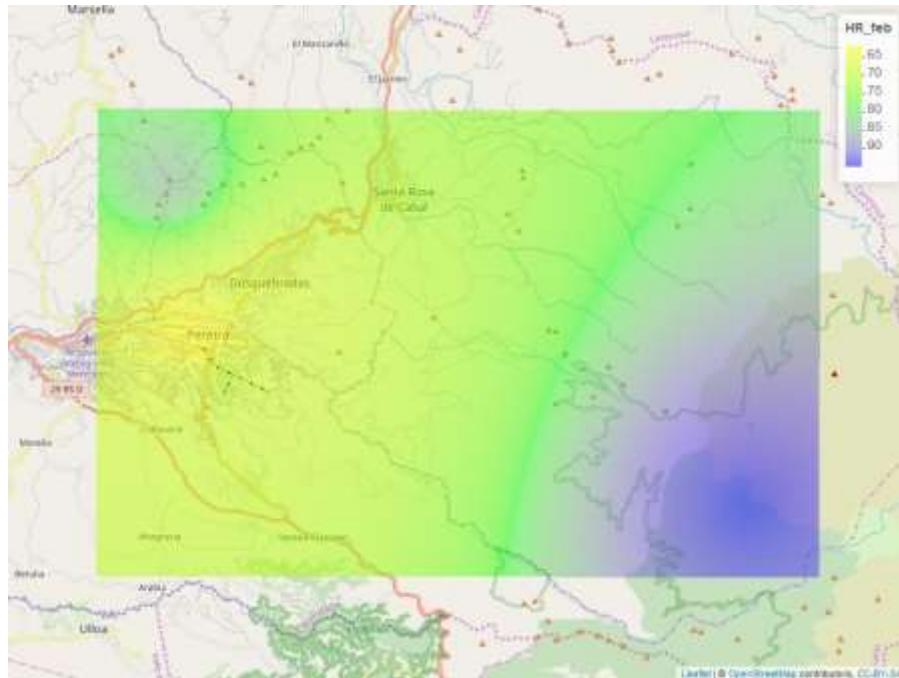


Fig 28. Mapa de comportamiento de humedad en Risaralda en el mes de febrero

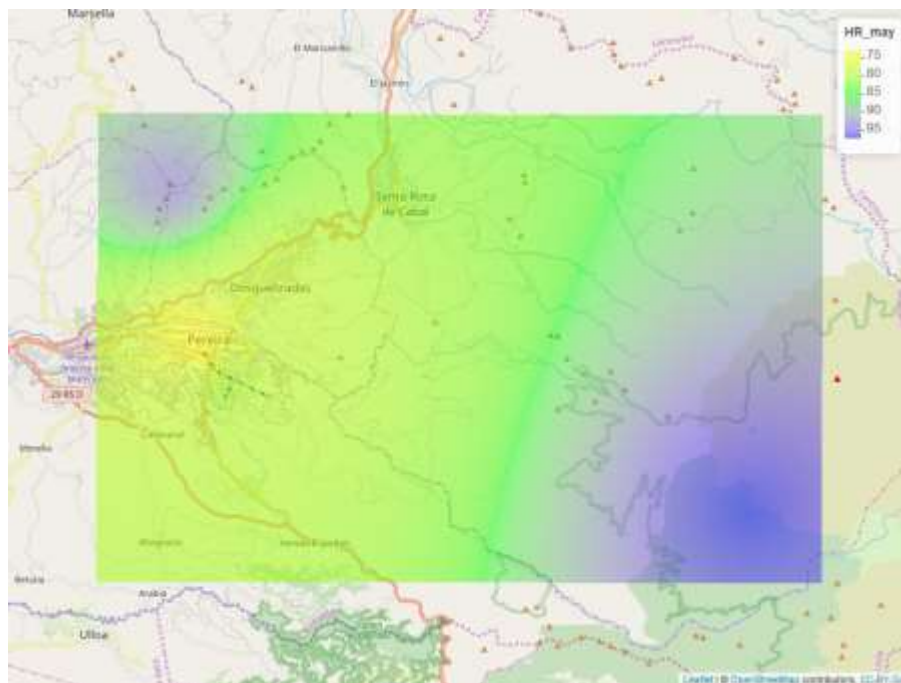


Fig 29. Mapa de comportamiento de humedad en Risaralda en el mes de mayo

Al analizar las figuras 28 y 29 del comportamiento de la humedad se puede ver que en las zonas del Alto del nudo y Cortaderal, se vuelve crítico en el mes de mayo, explicable por ser el mes de mayores precipitaciones.

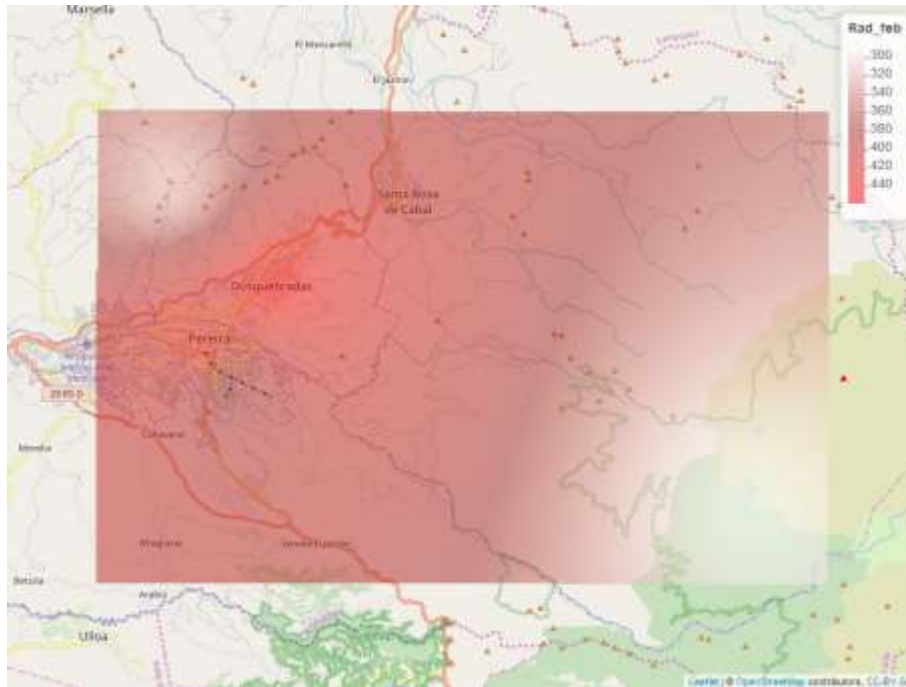


Fig 30. Mapa de radiación solar para el mes de febrero en Risaralda

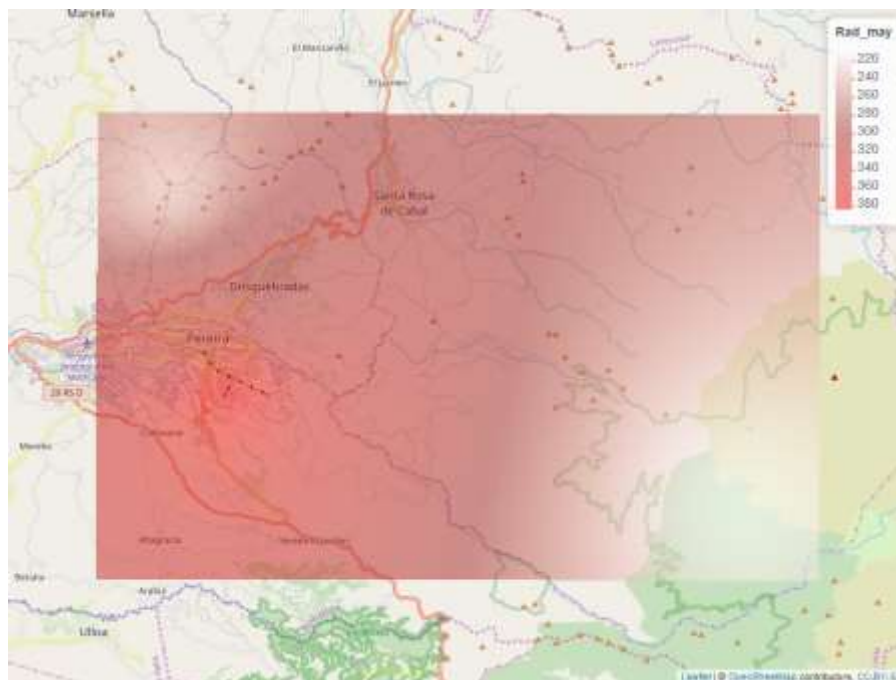


Fig 31. Mapa de radiación solar para Risaralda mes de mayo

En las figuras 30 y 31 sobre radiación solar en el departamento de Risaralda, encontramos que el mes de febrero presenta los mayores indicadores de radiación, los puntos de toma de datos Alto del nudo en la parte superior derecha y Cortaderal en la parte inferior izquierda muestran los menores indicadores de radiación con la mayor

Humedad Relativa y las temperaturas más bajas. Lo que gráficamente indica que estos puntos tienen el menor potencial total de secado.

2.4.3 Potencial de secado y velocidad de secado

Para ilustrar cómo influye el potencial de secado total en la velocidad de secado de los productos agrícolas, entendiendo la velocidad de secado como el tiempo que tarda una masa de agua en evaporarse de un producto y es la manera como se mide la eficiencia de un secador solar. Por tanto recurrimos a hacer el cálculo para un producto como el banano, común en el departamento de Risaralda.

El contenido de humedad se evalúa por el método de base húmeda, que es el recomendado para los productos agrícolas. La masa de contenido de humedad por unidad de masa del producto es normalmente denotado como "m". El contenido de humedad en base húmeda se calcula como (Duffie and Beckan, 2015)

$$m = \frac{m_w}{m_w + m_d} = \frac{m_w}{m_t} \text{ kg de agua / kg de producto} \quad (19)$$

m = Humedad contenida en base húmeda (wb)

m_d = Masa de material seco en el producto

m_w = Masa de agua en el producto

m_t = Masa total del producto

Según las tablas de contenido de humedad inicial y final para cada producto y la actividad del agua A_w para el banano (Pakrash and Kumar, 2017)(FAO, 2005). Tenemos que la humedad contenida inicial es de 85% y la humedad final debe ser de 15%, con un A_w para el banano de 0,6.

Para 10 kg de banano, aplicando la ecuación (19). Tenemos que la masa de agua a evaporar es de 8,5 kg

Se puede expresar el potencial de secado en términos de masa de agua, es decir, los kilogramos de agua evaporada (M_{ideal}) con la energía disponible en un intervalo de tiempo dado:

$$M_{ideal} = \frac{P_T}{q_v} \Delta t \quad (20)$$

Esta requiere la determinación del potencial de secado en el intervalo de tiempo. Propone también Condorí trabajar con valores medios diarios. Para lo que se entenderá que Δt equivale al día solar. Así que aplicando la ecuación (20) tenemos

Tabla 7 Tiempo en días solares requeridos para secar Banano

Lugar	Mes	q_v (kJ/kg)	P_T Watt	M_{ideal} kg/día solar	Día solar/10kg
UTP Pereira	Febero	2445	1533,89	2,2584	3,76
UTP Pereira	Mayo	2450	1024,60	1,5055	5,64
El Lago Pereira	Febrero	2450	1901,39	2,7933	3,04
El Lago Pereira	Mayo	2451	1316,65	1,9329	4,04
Cortaderal	Febrero	2480	389,47	0,5649	15,04
Cortaderal	Mayo	2482	264,82	0,3840	22,13
El CAMD/das	Febrero	2448	1615,76	2,375	3,57
El CAMD/das	Mayo	2450	1017,27	1,5205	5,59
Alto del nudo D/das	Febrero	2449	945,57	1,3899	6,11
Alto del nudo D/das	Mayo	2452	488,88	0,7177	11,84

El tiempo que tardan 10 kg de banano en deshidratarse o secarse, por intermedio de secadores solar sin precalentamiento del aire a la entrada de la cámara de secado como el que se ilustra en la (fig 28) si el potencial de secado es como en el Lago en Pereira, es de 3.04 días, en el mes de febrero, si fuera en el mes de mayo se tarda 4,04 días



Fig 32. Deshidratador solar tipo túnel PML01

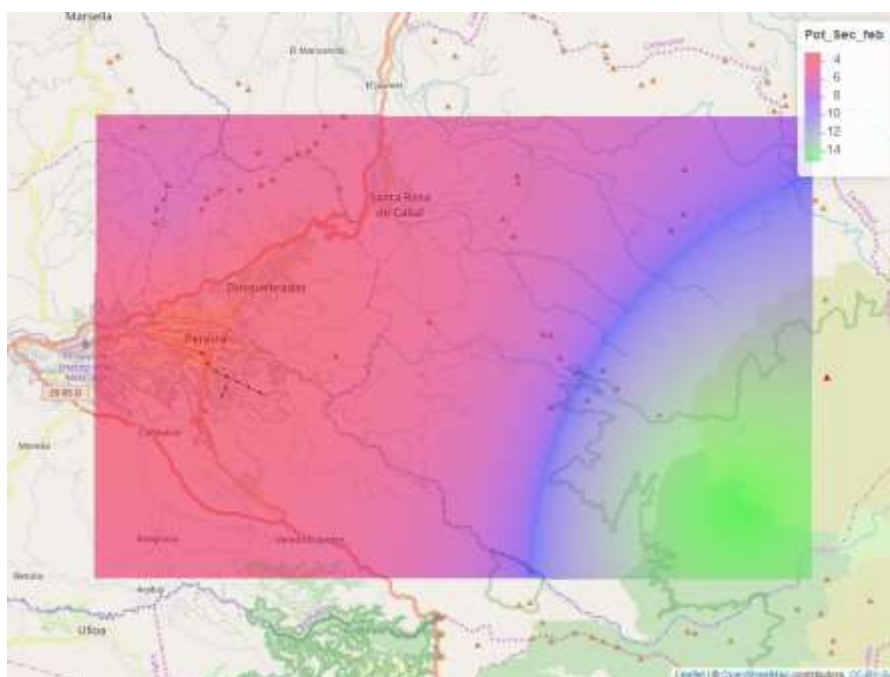


Fig 33. Potencial de secado mapeado según emplazamiento Febrero

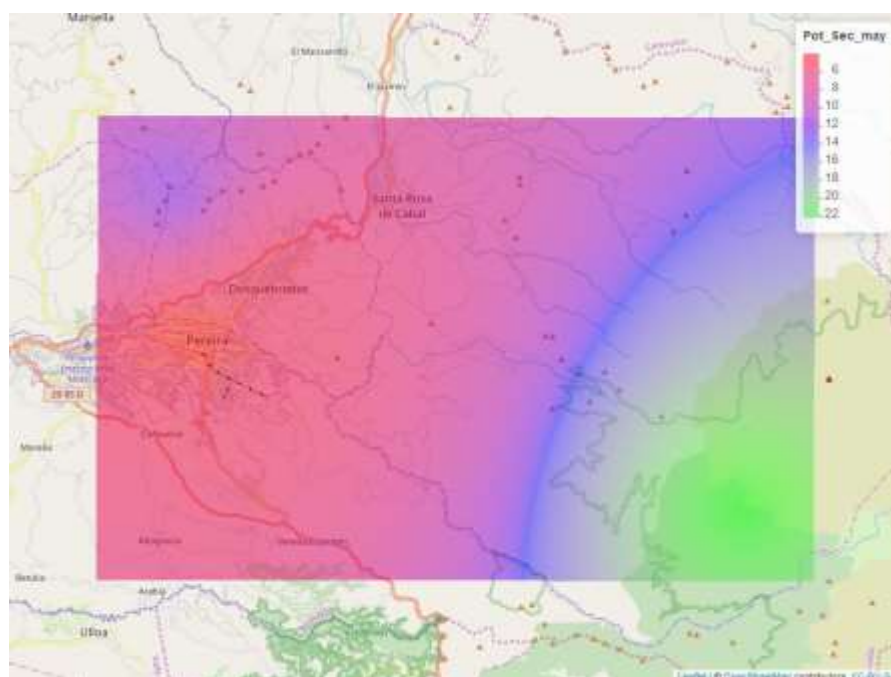


Fig 34. Potencial de secado mapeado según emplazamiento Mayo

En las figuras 33 y 34 se ilustra el potencial de secado por el número de días que demoran en secar 10kilos de banano, para tener una mejor idea de la manera cómo

influyen todas las variables asociadas al proceso, que aún con pequeñas variaciones de la temperatura, la humedad relativa o la radiación solar, muestra diferencias importantes en el número de días que se requieren para realizar el con un secador como el que se ilustra.

2.5. Discusión de resultados

Para la deshidratación solar se debe tener en cuenta que a mayor diferencia de temperatura entre el medio o la masa de aire de entrada y el producto a ser deshidratado, mayor será la transferencia calórica al producto y es ese efecto el que permite la remoción de agua desde su interior, hasta alcanzar la A_w de cada producto.

Para algunos de los puntos de toma, como el CAM en Dosquebradas y el Lago en la ciudad de Pereira, se ve que el potencial de secado por efecto de las condiciones ambientales P_a , como temperatura T y Humedad Relativa HR es más alto inclusive que la potencia obtenida por la radiación solar P_{RS} , lo que significa que se puede aprovechar aumentando la masa de aire que va a fluir sobre el producto, por esta vía aumenta la capacidad de remoción de agua, con lo que se requiere de menos tiempo de secado.

En los puntos del CAM en Dosquebradas para el mes de febrero y el Lago en la ciudad de Pereira para el mismo mes, que muestran una humedad relativa comparativamente más baja y una temperatura comparativamente mayor, hacen que el potencial de secado por las condiciones climáticas sea mayor, es decir, se considera que el aire tiene mayor capacidad de absorber agua, lo que es un factor muy importante para el proceso de secado, esto sucede aun sin radiación solar. Lo anterior indica que la capacidad de absorción y retención de agua de una masa de aire es mayor cuando la humedad relativa es baja.

En los procesos de deshidratación, el aire que entra pasa sobre los productos absorbiendo el agua que estos poseen y aumenta la humedad relativa en la cabina de secado, para que esa humedad sea removida debe existir un flujo de aire caliente con capacidad de absorber la humedad de la cabina, proceso que se puede dar por convección natural, factor que favorece para no recurrir a medios mecánicos como extractores, que aumentarían los costos del proceso.

Por el contrario como ocurre en el Alto del Nudo y Cortaderal en los meses de mayo, que muestran humedad relativa alta, por encima de 93% en el mes de mayo, denota un potencial de secado muy bajo, pues la masa de aire que entra a la cámara de secado

tiene tanta humedad que no tiene capacidad para absorber más agua y removerla del producto, lo que ocasiona deterioro del producto y aparición de hongos.

Se puede afirmar para los sitios de las estaciones estudiadas, que el potencial de secado depende más de las condiciones ambientales de un emplazamiento, particularmente de la humedad relativa, que de la disponibilidad de radiación solar, sin embargo, la radiación solar es indispensable para mejorar las condiciones de secado.

Al ser el secado solar un proceso de intercambio de masa y energía, es indispensable conocer la capacidad del aire de captar la humedad que proviene del producto que se esté deshidratando, el diseñador debe tomar la decisión de implementar un dispositivo que permita entrar aire caliente al sistema o que opte por una forma que haga fluir una masa de aire mucho mayor para que el aire nuevo que este entrando al sistema, tenga la capacidad de absorber la humedad que el producto está liberando.

3. CAPÍTULO III

Conclusiones y Recomendaciones

3.1 CONCLUSIONES

Con esta herramienta de evaluación del potencial de secado, se puede determinar el lugar de ubicación de los deshidratadores solares de un producto determinado, considerando su época de cosecha, los volúmenes de producción, la disponibilidad de radiación solar y las condiciones climatológicas.

El potencial de secado puede variar conforme cambian las condiciones climáticas, es decir, mes a mes tendremos diferentes resultados del Potencial total disponible, puesto que depende también de los regímenes de lluvia, que son diferentes de región a región y tienen una fuerte incidencia sobre la radiación solar.

Las condiciones climáticas afectan positiva o negativamente un proceso de secado o deshidratación solar, si se conoce la información climatológica de todos los municipios del departamento de Risaralda, la aplicación de esta tecnología va a ser más asertiva y eficiente.

El instrumento de evaluación de potencial de secado de una región o locación específica, es una herramienta decisión económica, importante tanto para los diseñadores

como para quien decida realizar la inversión en la tecnología de secadores o deshidratadores solares.

Conocer el potencial de secado de cada locación permite al diseñador decidir si su deshidratado necesita o no de una cámara de captación o calentamiento del aire que va a pasar sobre el producto.

Los deshidratadores solares son una solución de bajo costo para los campesinos, que les permite usar una tecnología limpia para agregar valor a los productos del campo, con la ventaja de disminuir tanto el peso, como el volumen, facilitando el transporte, sin demandar manejo de cadena de frío en los productos deshidratados.

3.2 RECOMENDACIONES

Es recomendable mantener esta información sobre las condiciones climáticas actualizada y disponible, para que un diseñador o emprendedor pueda realizar los ajustes a su proyecto, aplicando la metodología aquí empleada.

Se recomienda tener estaciones meteorológicas instaladas en los diferentes municipios del departamento, así el uso de las energías alternativas especialmente la energía solar térmica puede ser más eficaz.

Sería conveniente tener más estaciones o puntos de toma, para que la Red Hidroclimatológica de Risaralda, pueda entregar como un agregado la información para los doce meses del año del potencial total para secado solar de los municipios del departamento de Risaralda

Se recomienda formular un proyecto ante la secretaría de agricultura del departamento para identificar en cada uno de los municipios, el potencial de secado con energía solar, de los diferentes productos que se cosechan y se les pueda alargar la vida útil por este medio, de una forma más eficiente y a menor costo, considerando las épocas de cosecha.

Vale la pena iniciar otras investigaciones que permitan ahondar más sobre la dinámica de secado, para sacar más provecho de las condiciones ambientales de la locación, sobre todo en secadores por convección natural que no requieren el uso de

medios mecánicos como extractores de aire, que conllevan a un gasto energético adicional.

En un país como Colombia ubicado en el trópico, donde no existen estaciones, se hace necesario realizar muchas más investigaciones para sacar mayor provecho de una fuente energética como el sol, particularmente de la energía solar térmica, que permite aplicaciones para generar calor de proceso con una inversión relativamente baja, comparado con otros combustibles o uso de energía eléctrica. Que adicionalmente no genera impactos negativos sobre el ambiente, ni modifica el ambiente o el paisaje del lugar de emplazamiento, particularmente se podrían plantear investigaciones que presenten alternativas de diseño de deshidratadores híbridos, para que los productos deshidratados no ganen humedad en las horas de la noche o en ausencia de radiación solar por efecto de las nubes y se disminuyan los tiempos de secado.

4. BIBLIOGRAFÍA

Almada M., Caceres MS., Machain Singer M., Pulfer JC. (2005) *Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres. hortalizas, plantas medicinales y Carnes. Fundación Clelestina Perez de Almeda, FAO, Naciones Unidas Asunción Paraguay.*

Almeida CM., Agostinho F., Giannett BF., Huisinigh D(2015) Integrating cleaner production into sustainability strategies: an introduction to this special volumen. *Journal of Cleaner Production. Volume 96 p 1-9*

Aravindh M.A., Sreekumar A. (2015) *Solar Drying—A Sustainable Way of Food Processing. In: Sharma A., Kar S. (eds) Energy Sustainability Through Green Energy. Green Energy and Technology. Springer, New Delhi*

Banout J. (2017)Solar Drying Systems. Solar Drying Technology, Green Energy and Technology. Springer.

Condorí M., Altobelli F., Duran G., Martinez C.(2014) Solar Dryer efficiency considering the total drying potencial. Application of this potencial as a source indicador in norht- western Argentina. *Solar Energy 105, pp 742-759*

Departamento Nacional de Estadísticas DANE (2014) *Comportamiento del PIB Nacional y Departamental por sectores de la Economía*

Departamento Nacional de Planeación DNP (2016) *Diálogos Regionales para la planeación de un nuevo país*

Duffie JA.,&Beckam WA.(2013) *Solar Engineering of Thermal Processes.*Jhon Wiley & Sons,INC

Espinoza J. (2016) Innovación en el deshidratado solar. *Revista Chilena de Ingenieria, vol 24, pp72-80*

Fudholi A., Sopian K., Mohd M., Ruslan H., Hussein M., Kazem A. (2014) Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy, Volume 99 p 47-54*

Hegde VN., Hosur VS., Rathod SK., Harsoor PA. and Narayana KB(2015). Design, Fabrication and Performance Evaluation of Solar Dryer for Banana. *Energy, Sustainability and Society 5:23*

- Idowu et al.(2013) Determination of optimum tilt angles for solar collectors in low-latitude tropical región. *International Journal of Energy and Enviromental Engineering*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2012) *Atlas de distribución de la propiedad Rural en Colombia*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales DEAM (2017) *Atlas de Radiación Solar*.
- Islam SH., Dincer I. (2017) Development, analysis and performance assessment of a combined solar and geothermal energy-based integrated system for multigeneration. *Solar Energy, Volume 147 p 328-343*
- Jambhulkar AC, Pawar VB, Pawar SB, Dharwadkar AS, Pandure PS, Gadewar SP(2017) Solar Drying Techniques And Performance Analysis: A Review. *6th National Conference RDME 2017, 17th- 18th March 2017, M.E.S. College of Engineering, Pune*.
- Kumar Sadev R. (2014) Open sun and greenhouse drying of agricultural and food products: A Review Article . *International Journal of Engineering and Technical Research*
- Norton B. (2017) Characteristics of Different Systems for the Solar Drying of Crops. *Solar drying Technology. Green Energy and Technology*
- Phadke PC, Walke PV and Kriplani VM. (2015) A Review on Indirect Solar Dryers.ARPN *Journal of Engineering and Applied Sciences*
- Phonetip K., Ozarska B., Brodie G.I., Belleville B., Bouphe L.. (2018). GIS based solar kiln locations, *Bio Resources 13(2), 2785-2799*
- Prakash O. and Kumar A. (2014) Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 29*
- Puri M.(2016) How access to energy can influence food losses, a brief overview .*Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. Rome*.
- Rajarajeswari, K., Sunooj, K.V. & Sreekumar, A. (2016) Thermal Investigation and Food Quality Analysis on a Solar Tunnel Drier. *Current Sustainable Renewable Energy Rep*

Rolle, L., Giacosa S., Río Segade S., Ferrarini R., Torchio F., Gerbi V. (2013) Influence of Different Thermohygrometric Conditions on Changes in Instrumental Texture Properties and Phenolic Composition during Postharvest Withering of 'Corvina' Winegrapes (*Vitis vinifera* L.) *Journal Drying Technology*, Volume 31 p 549.564

Satwase AN, Pandhre GR, Sirsat PG, Wade YR (2013) Studies on Drying Characteristic and Nutritional Composition of Drumstick Leaves by Using Sun, Shadow, Cabinet and Oven Drying Methods. *Sustainable Renewable Energy*

Sharma VK and Anyanwu CN (2017) *Design Analysis and Studies on some Solar Drying Systems*. *Solar Drying Technology* Springer

Simate IN and Cherotich S (2017), Design and Testing of a Natural Convection Solar Tunnel Dryer for Mango. *Journal of Solar Energy*

Tiwari A. (2016) A Review on solar drying of agricultural products. *J Food Process Technol* 7:2623.

Umogbai VI, Iorter HA (2013) Design, construction and performance evaluation of a passive solar dryer for maize cobs. *Afr J Food Science Technology*

Verma P y Nidhi (2016) A review paper on Solar greenhouse Dryer. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* pp42-48

Vijayan S., Arjunan T.V., and Kumar A.(2017)Fundamental Concepts of Drying. *Chapter 1 O. Prakash, A. Kumar (eds.), Solar Drying Technology, Green Energy and Technology* p 3-38.

ANEXOS

Anexo 1

Anexo 1 Análisis estadístico municipios de Dosquebradas y Pereira

1.1 Análisis estadístico municipio de Dosquebradas

Información proveniente de la Red Hidroclimatológica de Risaralda REDH de los meses de febrero y mayo, de Temperatura, Humedad Relativa y Radiación Solar, para las horas de brillo solar entre las 10:00 y las 17 horas, datos de cada 5 minutos de las estaciones del CAM y Alto del Nudo

Con base en los resultados presentados en la tabla, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov (la cual se debe interpretar en caso de tener más de 50 datos, como es el caso), muestra una significancia menor a 0,05 y por lo tanto los datos de las variables dependientes temperatura, humedad y radiación solar (Dosquebradas) en los grupos formados por las variables independientes (factores) ubicación y mes, no tienen una distribución normal.

Pruebas de normalidad (Dosquebradas)								
		Kolmogorov-Smirnov ^a				Shapiro-Wilk		
UbicacionDQ	MesDQ		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
CAM	Febrero	TempDQ	,051	2225	,000	,976	2225	,000
		HumDQ	,053	2225	,000	,990	2225	,000
		RadDQ	,126	2225	,000	,917	2225	,000
	Mayo	TempDQ	,127	583	,000	,950	583	,000
		HumDQ	,075	583	,000	,988	583	,000
		RadDQ	,148	583	,000	,868	583	,000
Alto del Nudo	Febrero	TempDQ	,050	2220	,000	,980	2220	,000
		HumDQ	,073	2220	,000	,976	2220	,000
		RadDQ	,187	2220	,000	,791	2220	,000
	Mayo	TempDQ	,077	1739	,000	,981	1739	,000
		HumDQ	,083	1739	,000	,967	1739	,000
		RadDQ	,163	1739	,000	,768	1739	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Dado que no se cumple el supuesto de normalidad para los datos medidos en **Dosquebradas**, se realizó el análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) y con base en el resultado se observa que si hay diferencias significativas entre los grupos formados por la variable independiente ubicación (con sus dos niveles CAM y Alto del nudo) y dicho análisis se realizó para las 3 variables dependientes temperatura, humedad y radiación.

Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de TempDQ es la misma entre las categorías de UbicacionDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de HumDQ es la misma entre las categorías de UbicacionDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de RadDQ es la misma entre las categorías de UbicacionDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

El resultado muestra que si hay diferencia significativa entre los dos grupos y para cada variable dependiente.

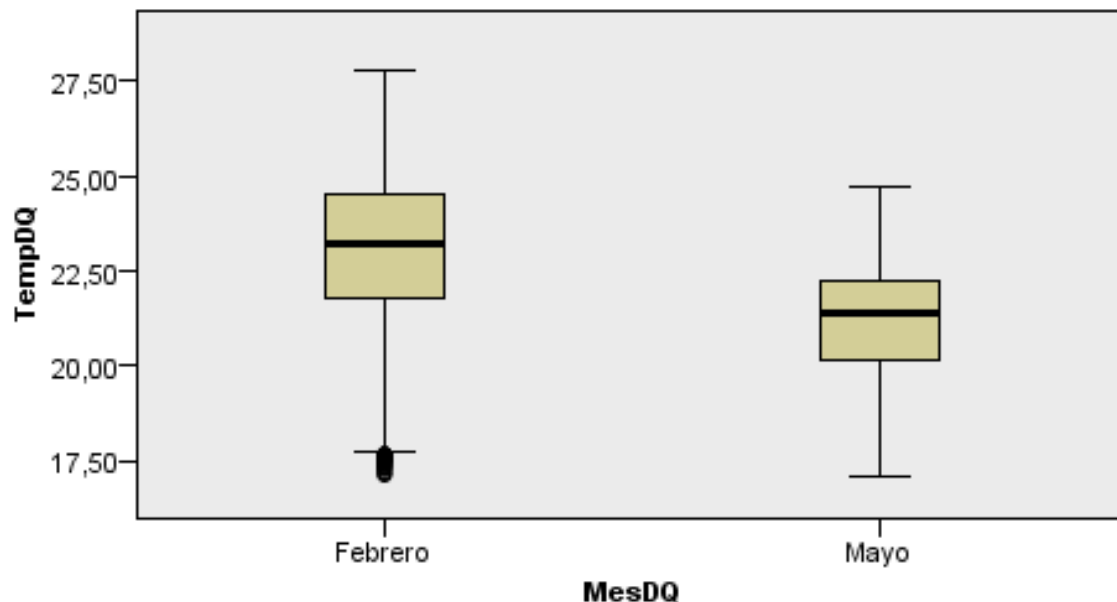
Se realizó el análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-wallis de 1 vía) para saber si hay diferencias significativas entre los dos grupos formados por el factor “Mes” para sus dos niveles (febrero y mayo), y la prueba se solicitó para las tres variables dependientes: TemperaturaDQ, HumedadDQ y RadiacióDQ. El resultado muestra que si hay diferencias significativas entre los dos meses.

Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de TempDQ es la misma entre las categorías de MesDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de HumDQ es la misma entre las categorías de MesDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de RadDQ es la misma entre las categorías de MesDQ.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

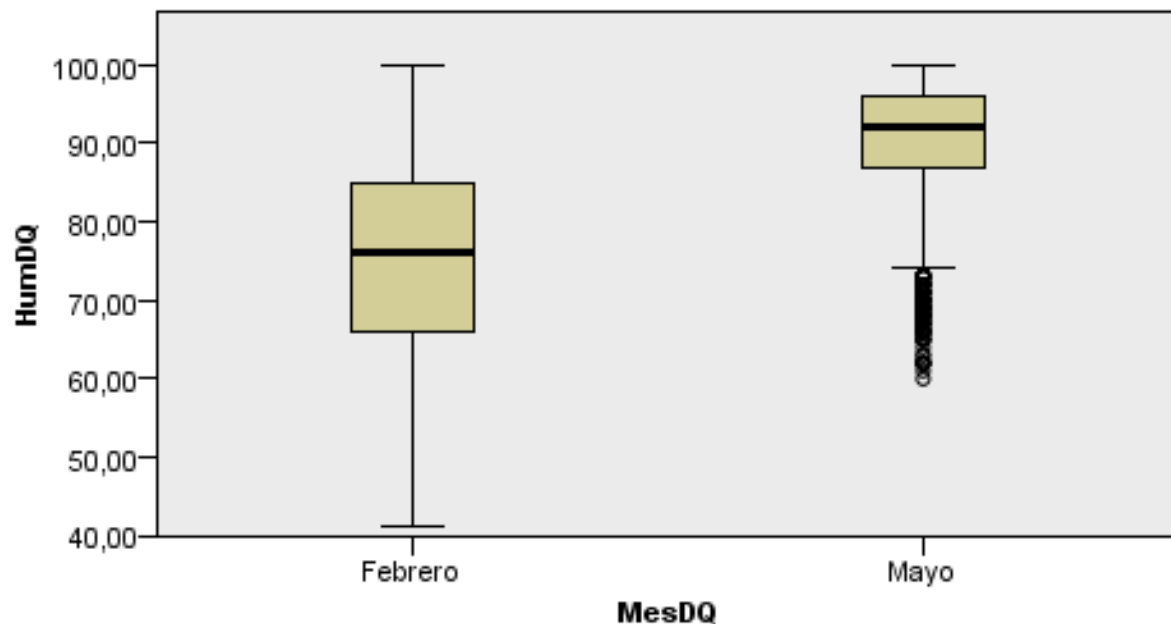
Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	6.769
Estadístico de contraste	1.402,653
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

- 1 Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

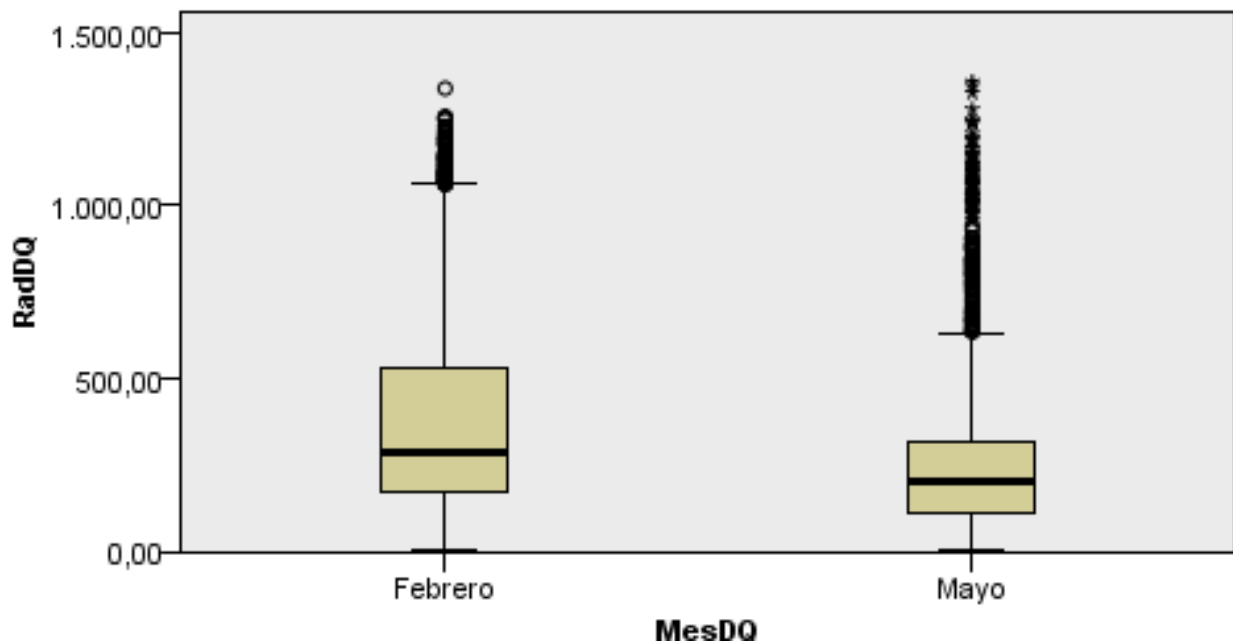
Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	6.769
Estadístico de contraste	2.091,623
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

- 1 Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
- 2 No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	6.767
Estadístico de contraste	369,926
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

- 1 Las estadísticas de prueba se ajustan para empates
- 2 No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
TempDQ	Se basa en la media	138,819	1	6767	,000
	Se basa en la mediana	136,940	1	6767	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	136,940	1	6515,903	,000
	Se basa en la media recortada	137,126	1	6767	,000
HumDQ	Se basa en la media	134,800	1	6767	,000
	Se basa en la mediana	138,005	1	6767	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	138,005	1	6612,326	,000
	Se basa en la media recortada	138,998	1	6767	,000
RadDQ	Se basa en la media	554,634	1	6765	,000
	Se basa en la mediana	407,279	1	6765	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	407,279	1	6737,034	,000
	Se basa en la media recortada	560,365	1	6765	,000

No se cumple la homogeneidad de varianzas (contraste de Levene), ya que la significancia fue menor a 0,05 y se rechaza la hipótesis nula de que las varianzas son iguales en todos los grupos. No se realizan pruebas pos-hoc solicitando las comparaciones múltiples ya que aquí solo se tienen dos grupos formados por los niveles CAM Y Alto del nudo. Por lo tanto la diferencia significativa, es entre esos dos grupos.

1.2 Análisis estadístico municipio de Pereira.

Con base en los resultados presentados en la tabla, la prueba de normalidad (Datos Pereira) de Kolmogorov-Smirnov muestra una significancia menor a 0,05 y por lo tanto los datos de las variables dependientes temperatura, humedad y radiación (Pereira) en los grupos formados por las variables independientes (factores) ubicación y mes, no tienen una distribución normal

Pruebas de normalidad (Pereira)

Ubicación	Per	Mes	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
El Lago	Febrero	Temperatura	,058	1636	,000	,983	1636	,000
		Humedad	,061	1636	,000	,981	1636	,000
		Radiación	,104	1636	,000	,938	1636	,000
	Mayo	Temperatura	,038	2956	,000	,996	2956	,000
		Humedad	,057	2956	,000	,984	2956	,000
		Radiación	,111	2956	,000	,921	2956	,000
UTP	Febrero	Temperatura	,121	1472	,000	,912	1472	,000
		Humedad	,111	1472	,000	,938	1472	,000
		Radiación	,154	1472	,000	,862	1472	,000
	Mayo	Temperatura	,047	2858	,000	,993	2858	,000
		Humedad	,063	2858	,000	,964	2858	,000
		Radiación	,109	2858	,000	,898	2858	,000
Cortaderal	Febrero	Temperatura	,073	1642	,000	,976	1642	,000
		Humedad	,167	1642	,000	,871	1642	,000
		Radiación	,146	1642	,000	,782	1642	,000
	Mayo	Temperatura	,062	2773	,000	,972	2773	,000
		Humedad	,249	2773	,000	,661	2773	,000
		Radiación	,150	2773	,000	,729	2773	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Dado que no se cumple el supuesto de normalidad se realizó el análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-wallis) y con base en el resultado se observa que si hay diferencias significativas entre los grupos formados por la variable independiente ubicación y esto se realizó para las variables dependientes temperatura, humedad y radiación.

Resumen de prueba de hipótesis

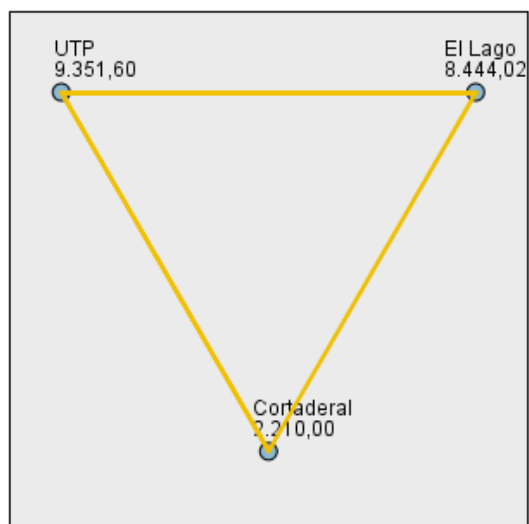
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Temperatura es la misma entre las categorías de UbicacionPer.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de Humedad es la misma entre las categorías de UbicacionPer.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de Radiacion es la misma entre las categorías de UbicacionPer.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

A continuación se presentan las comparaciones múltiples para saber entre que grupos formados por la variable independiente ubicación son las diferencias significativas para la variable de respuesta Temperatura.

Se observa que las diferencias significativas están entre todos los grupos (ver líneas amarillas en el gráfico) y ver también significancia ajustada ($< 0,05$) en el cuadro de comparaciones múltiples.

Comparaciones entre parejas de UbicacionPer



Cada nodo muestra el rango promedio de muestras de UbicacionPer.

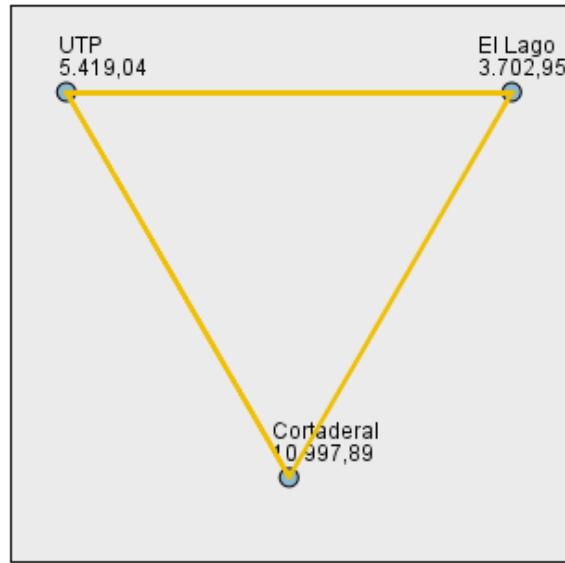
Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
Cortaderal-El Lago	6.234,024	81,189	76,784	,000	,000
Cortaderal-UTP	7.141,603	82,384	86,687	,000	,000
El Lago-UTP	-907,579	81,594	-11,123	,000	,000

- Cada fila prueba la hipótesis nula de que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son las mismas.
- Se muestran las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es ,05.
- Los valores de significación se han ajustado mediante corrección Bonferroni para varias pruebas

A continuación se presentan las comparaciones múltiples para saber entre que grupos formados por la variable independiente ubicación son las diferencias significativas para la variable de respuesta **Humedad**.

Se observa que las diferencias significativas están entre todos los grupos (ver líneas amarillas en el gráfico) y ver también significancia ajustada ($< 0,05$) en el cuadro de comparaciones múltiples.

Comparaciones entre parejas de UbicacionPer



Cada nodo muestra el rango promedio de muestras de UbicacionPer.

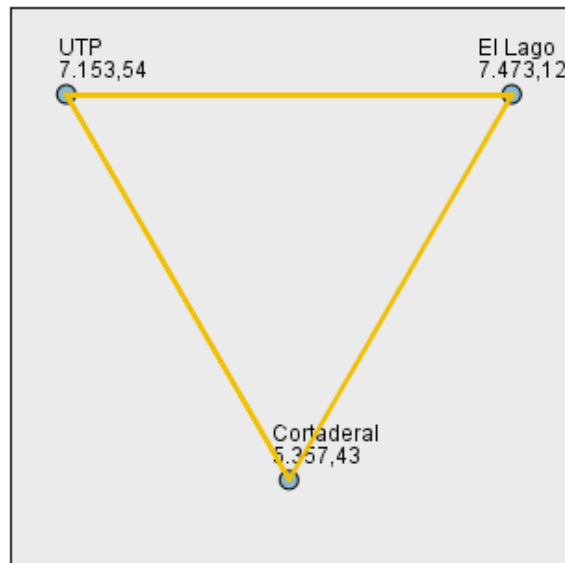
Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
El Lago-UTP	-1.716,094	81,543	-21,045	,000	,000
El Lago-Cortaderal	-7.294,941	81,138	-89,908	,000	,000
UTP-Cortaderal	-5.578,847	82,331	-67,761	,000	,000

- Cada fila prueba la hipótesis nula de que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son las mismas.
- Se muestran las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es ,05.
- Los valores de significación se han ajustado mediante corrección Bonferroni para varias pruebas

A continuación se presentan las comparaciones múltiples para saber entre que grupos formados por la variable independiente ubicación son las diferencias significativas para la variable de respuesta **Radiación**.

Se observa que las diferencias significativas están entre todos los grupos (ver líneas amarillas en el gráfico) y ver también significancia ajustada ($< 0,05$) en el cuadro de comparaciones múltiples.

Comparaciones entre parejas de UbicacionPer



Cada nodo muestra el rango promedio de muestras de UbicacionPer.

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
Cortaderal-UTP	1.796,108	82,348	21,811	,000	,000
Cortaderal-El Lago	2.115,686	81,153	26,070	,000	,000
UTP-El Lago	319,578	81,558	3,918	,000	,000

- Cada fila prueba la hipótesis nula de que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son las mismas.
- Se muestran las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es ,05.
- Los valores de significación se han ajustado mediante corrección Bonferroni para varias pruebas
-

Se realizó también el ANOVA no paramétrico (Kruskal-Wallis) para el factor “Mes” con sus dos niveles (febrero y mayo) para los datos de temperatura, humedad y radiación en **Pereira** y los resultados se muestran a continuación:

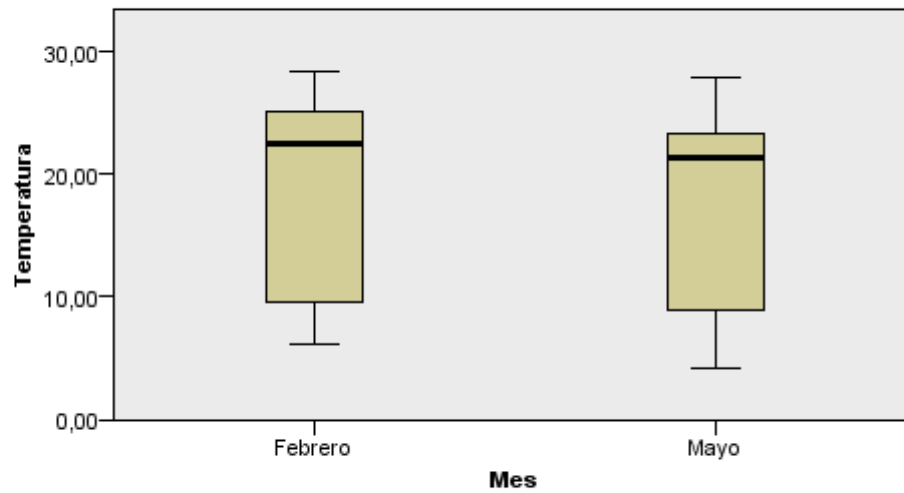
Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Temperatura es la misma entre las categorías de Mes.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de Humedad es la misma entre las categorías de Mes.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de Radiación es la misma entre las categorías de Mes.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,507	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0,05

Se observa que para las variables temperatura y humedad hay diferencia significativa entre los grupos formados por los meses de febrero y mayo pero que para la variable radiación no hay diferencia significativa $0,507 > 0,05$.

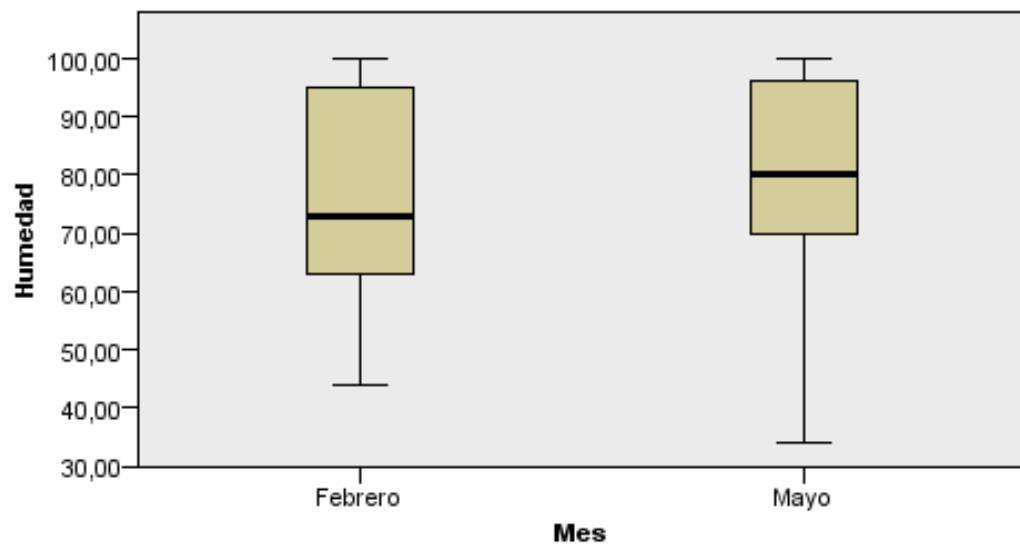
Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	13.349
Estadístico de contraste	370,729
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates.
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

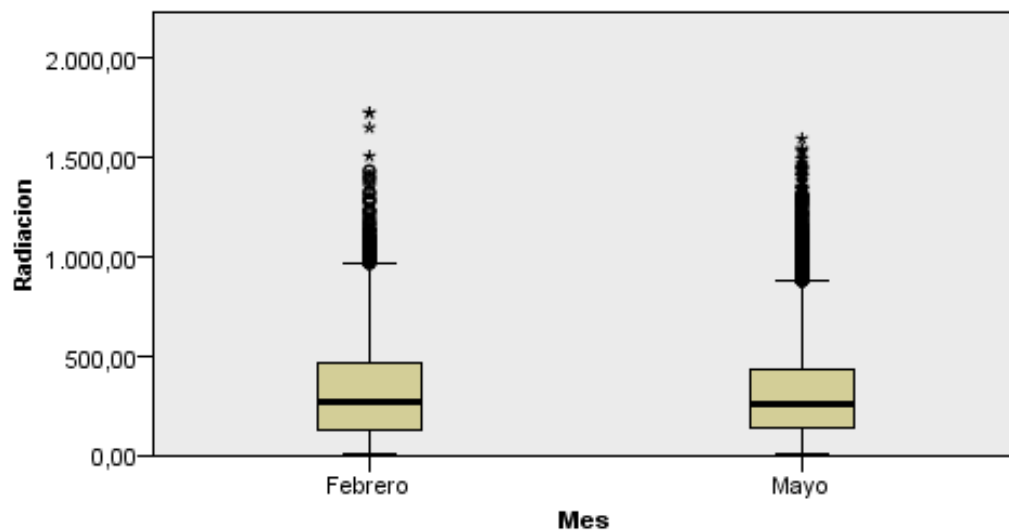
Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	13.349
Estadístico de contraste	246,496
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates.
2. No se realizan múltiples comparaciones porque hay menos de tres campos de prueba.

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes



N total	13.337
Estadístico de contraste	,440
Grados de libertad	1
Sig. asintótica (prueba bilateral)	,507

Las estadísticas de prueba se ajustan para empates.
 No se realizan múltiples comparaciones porque la prueba global no muestra diferencias significativas en las muestras.

Prueba de homogeneidad de varianzas (Pereira)

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Temperatura	Se basa en la media	778,215	2	13346	,000
	Se basa en la mediana	762,190	2	13346	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	762,190	2	11634,883	,000
	Se basa en la media recortada	775,530	2	13346	,000
Humedad	Se basa en la media	1838,465	2	13346	,000
	Se basa en la mediana	1891,136	2	13346	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1891,136	2	11017,998	,000
	Se basa en la media recortada	1889,590	2	13346	,000
Radiacion	Se basa en la media	317,112	2	13334	,000
	Se basa en la mediana	236,017	2	13334	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	236,017	2	12871,785	,000
	Se basa en la media recortada	312,071	2	13334	,000

Dado que no se cumple la homogeneidad de varianzas (contraste de levene), ya que la significancia fue menor a 0,05 y se rechaza la hipótesis nula de que las varianzas son iguales en todos los grupos, se solicitaron las comparaciones múltiples en las pruebas pos-hoc (pos-test) con estadísticos que no asumen homogeneidad de varianzas (Tamhane, Dunnet y Games-Howell) y los resultados se muestran a continuación:

comparaciones múltiples (Pereira)

Variable dependiente		(I) UbicacionPer					
		El Lago		UTP		Cortaderal	
		(J) UbicacionPer		(J) UbicacionPer		(J) UbicacionPer	
		UTP	Cortaderal	El Lago	Cortaderal	El Lago	UTP
Temperatura	Tamhane	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	T3 Dunnett	,001	,001	,001	,000	,001	,000
	Games- Howell	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Humedad	Tamhane	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	T3 Dunnett	,001	,000	,001	,000	,000	,000
	Games- Howell	,000	,000	,000	,000	,000	,000
Radiacion	Tamhane	,792	,000	,792	,000	,000	,000
	T3 Dunnett	,792	,001	,792	,001	,001	,001
	Games- Howell	,686	,000	,686	,000	,000	,000